

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ РФ**  
**ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ**  
**СООБЩЕНИЯ**

**В.П.Закарюкин**

**ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

*Конспект лекций  
для студентов специальности  
"Электроснабжение железнодорожного транспорта"*



**Иркутск 2005**

УДК 621.31.048

**Закарюкин В.П. Техника высоких напряжений:** Конспект лекций.  
– Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 137 с.

Конспект лекций содержит основные сведения по электрическим разрядам в диэлектриках, характеристикам изоляторов, механизмам старения изоляции, методам контроля изоляции, по вопросам перенапряжений и методам защиты от перенапряжений.

Конспект предназначен для студентов дневного и заочного обучения специальности "Электроснабжение железнодорожного транспорта" и соответствует рабочей программе дисциплины "Техника высоких напряжений".

Илл. 65. Табл. 8. Библиогр.: 12 назв.

Рецензенты:

© Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
Лекция 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГАЗАХ.....	15
1.1. Терминология и определения.....	15
1.2. Виды токов в изоляции и вольтамперная характеристика газового промежутка.....	16
1.3. Диэлектрические потери и угол потерь.....	17
1.4. Механизмы пробоя изоляции.....	18
1.5. Пробой газового промежутка с однородным полем.....	19
1.6. Особенности пробоя газового промежутка с резконеоднородным электрическим полем.....	20
1.7. Пробой газового промежутка при импульсном напряжении.....	21
1.8. Перекрытие изоляции.....	23
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	24
Контрольные вопросы.....	25
Лекция 2. ИЗОЛЯТОРЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ПОДСТАНЦИЙ.....	26
2.1. Основные характеристики изоляторов.....	26
2.2. Линейные и станционные изоляторы.....	29
2.3. Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов.....	31
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	33
Контрольные вопросы.....	33
Лекция 3. ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК.....	34
3.1. Изоляция силовых трансформаторов.....	34
3.2. Изоляция вводов высокого напряжения.....	36
3.3. Изоляция силовых конденсаторов.....	38
3.4. Изоляция силовых кабелей.....	41
3.5. Изоляция электрических машин высокого напряжения.....	42
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	43
Контрольные вопросы.....	43
Лекция 4. ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ.....	44
4.1. Дефекты изоляции и механизмы их возникновения.....	44
4.2. Основные виды профилактических испытаний изоляции.....	47
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	48
Контрольные вопросы.....	48
Лекция 5. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ.....	49
5.1. Контроль сопротивления изоляции.....	49
5.2. Контроль емкости изоляции.....	52
5.3. Хроматографический анализ масла.....	54
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	54
Контрольные вопросы.....	55
Лекция 6. КОНТРОЛЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И ИЗМЕРЕНИЕ	

ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ .....	55
6.1. Контроль диэлектрических потерь в изоляции .....	55
6.2. Контроль частичных разрядов .....	58
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	59
Контрольные вопросы .....	59
Лекция 7. КОНТРОЛЬ ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ. ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ОБОРУДОВАНИЯ .	59
7.1. Испытания изоляции повышенным напряжением .....	59
7.2. Испытания изоляции кабелей, трансформаторов и высоковольтных вводов .....	62
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	64
Контрольные вопросы .....	64
Лекция 8. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ .....	65
8.1. Повреждаемость изоляции контактной сети .....	65
8.2. Основные методы контроля изоляции контактной сети .....	66
8.3. Методы повышения надежности изоляции контактной сети .....	68
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	69
Контрольные вопросы .....	69
Лекция 9. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОГО ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....	69
9.1. Испытательные установки высокого переменного напряжения .....	69
9.2. Испытательные установки высокого постоянного напряжения .....	72
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	74
Контрольные вопросы .....	74
Лекция 10. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ .....	75
10.1. Генераторы коммутационных импульсов .....	75
10.2. Генераторы импульсных напряжений .....	76
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	80
Контрольные вопросы .....	80
Лекция 11. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ .....	80
11.1. Измерение высоких постоянных напряжений .....	80
11.2. Измерение высоких переменных напряжений .....	82
11.3. Измерение высоких импульсных напряжений .....	85
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	87
Контрольные вопросы .....	88
Лекция 12. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ .....	88
12.1. Общая характеристика перенапряжений .....	88
12.2. Общая характеристика защитных мероприятий .....	90
12.3. Характеристики грозовой деятельности и параметры молний .....	92
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	96
Контрольные вопросы .....	96
Лекция 13. АТМОСФЕРНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ .....	97
13.1. Перенапряжения прямого удара молнии .....	97

13.2. Индуктированные перенапряжения .....	98
13.3. Грозопоражаемость контактной сети.....	99
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	100
Контрольные вопросы .....	101
Лекция 14. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ .....	101
14.1. Распространение волн перенапряжений вдоль проводов .....	101
14.2. Перенапряжения на оборудовании, подключенном к линии .....	105
14.3. Импульсные процессы в обмотках трансформаторов.....	107
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	109
Контрольные вопросы .....	110
Лекция 15. КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ И КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ .....	110
15.1. Емкостный эффект линий электропередачи .....	110
15.2. Резонансное смещение нейтрали в сетях 3..35 кВ .....	111
15.3. Перенапряжения при гашении дуги.....	113
15.4. Коммутационные перенапряжения .....	115
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	117
Контрольные вопросы .....	117
Лекция 16. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ .....	117
16.1. Координация изоляции .....	117
16.2. Устройства для защиты от перенапряжений.....	119
16.3. Основные принципы грозозащиты линий и контактной сети.....	124
16.4. Основные принципы защиты подстанций.....	127
<i>РЕЗЮМЕ</i> .....	129
Контрольные вопросы .....	129
Заключение .....	130
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	135

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Лекционный курс по дисциплине «Техника высоких напряжений» представляет собой очень сжатое изложение имеющегося материала и предназначен для студентов дневного и заочного обучения специальности «Электроснабжение железнодорожного транспорта». Здесь содержатся основные сведения о характере пробоя диэлектриков, о конструктивных особенностях высоковольтной изоляции, о механизмах возникновения дефектов в изоляции и методах ее контроля, о перенапряжениях и методах защиты от них.

Материал дисциплины разбит на шестнадцать лекций с добавлением введения, заключения и списка рекомендуемой литературы.

В первой лекции представлены основные сведения о пробое диэлектриков и перекрытии изоляции. Во второй и третьей лекциях рассмотрены вопросы конструкции изоляторов и изоляции высоковольтной аппаратуры. Четвертая, пятая, шестая, седьмая и восьмая лекции посвящены основным методам и особенностям контроля изоляции, девятая, десятая и одиннадцатая лекции рассматривают вопросы конструкции испытательного оборудования и измерения высоких напряжений. С двенадцатой по шестнадцатую лекцию в весьма сжатой форме даны вопросы перенапряжений и защиты от них.

Конспект лекций рекомендуется для изучения материала дисциплины «Техника высоких напряжений» при освоении лекционного материала и при подготовке к лабораторным работам.

При составлении рукописи были использованы материалы книг [1, 2, 7], нормативные документы [8, 9], а также некоторые сведения из книг [3, 4, 5, 6, 7, 12].

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционное разделение электроустановок на установки низкого напряжения и высоковольтные электроустановки с границей в 1000 В определяется уровнем опасности для человека. Существует, однако, другой серьезнейший фактор, приводящий к коренному отличию электроустановок низкого и высокого напряжений – это поведение изоляции электроустановки. В низковольтных установках в подавляющем большинстве случаев изоляционные расстояния определяются механическими соображениями, то есть возможностью выдерживать механические нагрузки или исключением возможного соприкосновения токоведущих частей между собой. В высоковольтных установках на первое место выходит проблема возможных повреждений изоляции из-за большого напряжения на ней. К примеру, для напряжения 220 В воздушный промежуток в доли миллиметра с точки зрения электрической прочности уже вполне приемлем (хотя и недостаточен из-за возможности механического соприкосновения), то для напряжения 110 кВ воздушный промежуток размером в десятки сантиметров уже не является изоляцией и вполне может быть пробит. Именно специфическая проблема изоляции при высоких напряжениях ставит основной задачей техники высоких напряжений обеспечение необходимого уровня электрической изоляции элементов электроустановок. Высокие напряжения широко используются в электротехнологии (осаждение частиц в сильном электрическом поле, электрогидравлический эффект и др.), а также в электрофизических установках различного назначения.

Техника высоких напряжений представляет собой науку о характеристиках устройств и процессах в них при экстремальных электромагнитных воздействиях – высоких напряжениях и сильных токах, а также о технологическом использовании этих процессов. Один из основных разделов техники высоких напряжений посвящен свойствам и характеристикам изоляционных конструкций электрооборудования высокого напряжения и условиям их надежной эксплуатации при воздействии рабочего напряжения, грозовых и внутренних перенапряжений. Именно этот раздел в основном и представлен в данном лекционном курсе.

Все понятия, определения и вопросы техники высоких напряжений базируются на основных положениях электротехники, и, безусловно, на основных особенностях человеческого восприятия и познания. Важность этих базисных положений настолько велика, что лишний их повтор вполне оправдан.

Человек воспринимает окружающий мир тремя основными путями.

Во-первых, это чувственно-рассудочное восприятие, способность распознавать окружающее с помощью органов чувств и формировать на основе ощущений представление об объектах мира. Этот тип восприятия

доступен и животным, особенно – высшим животным; они так же воспринимают мир, как и человек, также ощущают радость и страдание. Растениям такое восприятие недоступно, они существуют по раздражителям, а не по представлениям. Надо подчеркнуть, что у нас есть только представление об окружающем мире, сформированное органами чувств (два глаза дают два перевернутых изображения, два уха дают сигналы о двух звуках и так далее, с очень тонкой и чувствительной обработкой, с созданием в итоге представления для нашего центрального Я). Только наше тело дано нам и как представление, и непосредственно.

Во-вторых, человек познает мир с помощью разума. Человек способен выделить общие свойства ряда объектов и облечь эти свойства в понятия; человек способен распознать законы, управляющие этими понятиями (в первую очередь, законы логики). Человек может, наконец, применить понятия и законы к единичному проявлению, что дает поразительные результаты. Так построены все наши науки, за исключением, может быть, философии; последняя стоит особняком, поскольку пытается подвести разумную базу под неразумный объект (в смысле того, что этот объект обособлен от разума), то есть пытается разумным способом познать это центральное человеческое Я, составляя общее представление о мире, о человеке, о способах познания мира человеком.

Разумное познание обладает одной интересной особенностью. Разум имеет женскую природу, он способен воспринимать и хранить, но не способен родить сам; куда он направится, решает центральное человеческое Я. Разум – это тактик, а не стратег, направление выбирается не разумом. Поэтому разум может сочетаться как с добром, так и с большим злом.

Есть еще и третий путь познания, не только окружающего мира, но и мироздания. В философии он называется умственным созерцанием или интуицией; похоже, общий термин «интуиция» все-таки довольно близко отображает суть дела. Это – восприятие без посредства органов чувств. В какой-то степени способность такого восприятия доступна всем людям, но особо выражена она у гениев. Кроме того, гениальные люди могут выражать и передавать это восприятие другим особыми средствами, к которым относятся искусства: живопись, музыка, поэзия и проза. Прямое назначение искусств – именно в передаче результатов этого умственного созерцания (в которое могут входить не только нынешние состояния мировых объектов, но и их возможное развитие), и мы все в какой-то степени это ощущаем. Конечно, степень передачи в разных произведениях искусства разная, и некоторые произведения вовсе не несут в себе ничего подобного, в частности, так называемая массовая культура, потакающая низменным чертам человеческой сути.

Построение наук на основе понятий (сюда относятся не только философские категории, конечно, но и определения величин, и аксиомы, и законы как всеобщие связи) требует очень серьезного освоения базисного



набора понятий данной науки, базисных законов и определений величин; значимость остального набора информации ниже. Наиболее явно это представлено в математике, где сначала определяются некоторые понятия и вводится ряд аксиом, а потом доказываются теоремы. Математика является базовой дисциплиной для всех приложений компьютерной техники, и математика очень важна и для электротехники.

Электротехника также имеет все черты аксиоматичной науки: набор аксиом определяет дальнейшую структуру всех приложений электротехники. Такими аксиомами в электротехнике являются определения электротехнических величин и формулировки законов электромагнетизма (вместе с законами Кирхгофа и Ома). На их базе строится вся электротехника, и для нормального понимания вопросов электромагнитного влияния необходимо выводить их из набора аксиом электромагнетизма. Собственно, пониманием материала дисциплины, а также нормальным объяснением какого-либо неочевидного положения следует считать возможность сведения утверждений к аксиоматическому базису путем логических построений. В связи с этим ниже приводятся сведения базисного плана, на которых построены выводы теории электромагнитной совместимости.

Исходным пунктом в определении величин электротехники можно считать *закон Кулона* и выводимое из него понятие величины электрического заряда  $q$ . Закон Кулона опирается на фундаментальное понятие механической силы и признание некоторого особенного рода силовых взаимодействий тел, названных электрическими (электромагнитными) взаимодействиями. В нем заложено произведение зарядов двух тел, но для выделения одного заряда достаточно привести третье заряженное тело и определить три попарных произведения зарядов, из которых однозначно определяются все три заряда тел.

Силовые взаимодействия заряженных тел определили подход к описанию собственно электрического поля. *Напряженностью электрического поля*  $\vec{E}$  назвали силу, с которой поле действует на тело с зарядом в 1 Кл (точнее говоря, предел отношения силы к заряду при уменьшении заряда к нулю; далее некорректности этого рода не будут сопровождаться оговорками). Для выделения составляющих этой силы ввели понятие *индукции электрического поля*  $\vec{D}$ , которая определяет часть электрической силы, обусловленную зарядами – источниками электрического поля. Собственно, сила от источников определяется отношением  $\vec{D}$  к электрической постоянной  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Вторая составляющая силы получается за счет влияния диэлектрической среды, и эта составляющая уменьшает первичную силу. Параметром диэлектрической среды, характеризующим степень ослабления первичной силы, является относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r$ .

Кроме силовых существуют еще энергетические характеристики

электрического поля. Понятие энергии довольно неопределенное, разве что можно с большими натяжками провести параллель между энергией и деньгами как мерой затраченных на производство товара человеческих усилий; определение энергии как способности тела совершать работу не слишком сильное и малопродуктивное. В общем, нашлась некая величина, сохраняющаяся при различных взаимодействиях и тем удобная. Через эту величину вводится понятие **потенциала**  $\varphi$ , равного энергии, которую обладает в электрическом поле тело с зарядом в 1 Кл; обычно нулем этой энергии считается энергия тела в бесконечном удалении. **Напряжением** называют разность потенциалов между двумя точками поля, одна из них начальная, другая – конечная, точки неравноправны:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -(\varphi_2 - \varphi_1).$$

При такой трактовке разности потенциалов оказывается, что напряжение – это работа сил электрического поля при перемещении тела с зарядом в 1 Кл из точки 1 в точку 2. Весьма близкая к напряжению величина – **ЭДС источника электроэнергии**; ею называется энергия, сообщаемая заряженным частицам с суммарным зарядом в 1 Кл, прошедшим через источник.

Все перечисленные величины характеризуют для начала неподвижные заряды. Для перемещающихся заряженных частиц первой характеристикой – **величина электрического тока**  $I$ , протекающего через сечение объекта, которая представляет собою количество заряда, протекшего через сечение за 1 с. Если ток не постоянный, то для него вводится еще ряд понятий. Во-первых, это мгновенное значение тока  $i(t)$  или просто  $i$  – значение тока в заданный момент времени (или во все моменты времени). Для периодического (не обязательно синусоидального, но обязательно периодического) тока существует понятие **действующего (эффективного) значения тока**  $I$ , означающего в простейшей трактовке такое значение постоянного тока, которое так же нагревает резистор, как и данный переменный ток (разумеется, в одинаковых условиях нагревания). Более корректно под действующим значением периодического тока понимают среднеквадратичное за период значение величины тока. Кроме того, есть понятие **амплитуды тока, среднего значения тока** за период (то есть постоянной составляющей) и **среднего значения тока за полупериод**. Все указанные значения относятся и к напряжению.

Магнитное поле характеризуется прежде всего **индукцией магнитного поля**  $\vec{B}$ , являющейся силовой характеристикой поля, которую не слишком строго можно определить как силу, действующую со стороны магнитного поля на проводник с током 1 А длиной 1 м, ориентированный в пространстве так, чтобы сила была максимальна. Действующая сила складывается из силы со стороны источников магнитного поля (намагничивающих токов) и силы со стороны намагниченной среды; первая сила определяется

**напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$** , которую можно назвать частью силы со стороны намагничивающих токов. Соотношение между этой частью силы и полной силой, которая определяет индукцию, описывается относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r$ . **Поток магнитного поля  $\Phi$**  через площадку, ограниченную некоторым контуром (может быть, из провода) – это поток вектора магнитной индукции  $\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$  через эту площадку,

или, грубо говоря, число линий магнитного поля, пересекающих площадку.

Все перечисленные выше характеристики описывают состояние некоторой системы или процессы в ней (если состояние меняется во времени). Как известно, имеются еще характеристики отдельных элементов, не зависящие от электромагнитного состояния и представляющие собой некоторые коэффициенты пропорциональности между характеристиками процесса. Из этих характеристик ниже упоминаются лишь некоторые, наиболее важные для темы дисциплины.

**Сопротивление** резистора (а резистор – это элемент, назначение которого состоит только в переводе электрической энергии в тепло) - это отношение напряжения на зажимах резистора к току через его сечение.

**Емкость** конденсатора, имеющего на пластинах одинаковые по величине и разные по знаку заряды, определяется как абсолютная величина отношения заряда одной из пластин к напряжению между пластинами. Условие насчет зарядов означает, во-первых, всего лишь два тела в системе (две пластины конденсатора), во-вторых, опирается на закон сохранения величины электрического заряда в системе и, в-третьих, предполагает первоначальную электрическую нейтральность системы.

**Индуктивностью  $L$**  некоторого проволочного контура называется величина магнитного потока, созданного током 1 А этого же контура. В совокупности с законом электромагнитной индукции и с пропорциональностью магнитного поля намагничивающему току (что фиксируется законом полного тока) такое определение позволяет связать напряжение на контуре (или катушке из последовательно соединенных контуров) со скоростью изменения тока контура.

**Взаимной индуктивностью  $M$**  между двумя контурами называют величину магнитного потока в одном из контуров, созданного другим контуром при токе в нем 1 А. В данном случае неважно, какой из контуров создает магнитное поле.

Перечисленных определений величин в основном хватит для понимания материала пособия. Остается сказать несколько слов о законах электромагнетизма, на которые явно или неявно есть ссылки по ходу изложения.

**Первый закон Кирхгофа** представляет собою просто закон сохране-

ния величины электрического заряда в системе, дополненный условием невозможности накопления электрического заряда в узле электрической цепи. **Второй закон Кирхгофа** – это перефразированный закон сохранения энергии с предположением о мгновенности распространения электромагнитных взаимодействий в электрической цепи. Оба закона Кирхгофа верны лишь для электрически коротких цепей. **Закон Ома** требует привязки напряжения к зажимам двухполюсника и тока к сечению ветви между этими полюсами. В простейшей трактовке закон Ома звучит так: величина тока, протекающего через поперечное сечение электрической ветви, ограниченной двумя узлами, пропорциональна напряжению между этими узлами.

**Закон электромагнитной индукции** связывает ЭДС в контуре со скоростью изменения магнитного потока в нем:  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$ . Направление

ЭДС в контуре связано с положительным направлением магнитного потока в контуре правилом правого винта. В совокупности с **законом полного тока**, объявляющего пропорциональность между напряженностью магнитного поля и намагничивающими токами, закон электромагнитной индукции позволяет использовать понятие взаимной индуктивности для описания взаимосвязи между скоростью изменения намагничивающего тока с наводимой при этом ЭДС. Для синусоидального тока и линейной системы взаимная индуктивность дает простую пропорциональную зависимость намагничивающего тока в контуре, создающем магнитное поле, и наводимой в другом контуре ЭДС.

**Закон полного тока** в аккуратной формулировке звучит так: циркуляция вектора напряженности магнитного поля по некоторому контуру равна полному току внутри этого контура,  $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k \text{ внутри } L} I_k$ , направление обхода контура и положительное направление тока внутри контура связаны друг с другом правилом правого винта.

**Закон Гаусса** определяет взаимосвязь индукции электрического поля с электрическим зарядом, создающим поле: поток вектора электрической индукции через замкнутую поверхность равен суммарному заряду внутри этой поверхности,  $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{k \text{ внутри } S} q_k$ .

**Закон непрерывности линий индукции магнитного поля** утверждает отсутствие магнитных зарядов: поток вектора индукции магнитного поля через замкнутую поверхность равен нулю,  $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$ .

Изучение данной дисциплины и технических дисциплин вообще имеет ряд основных особенностей; наиболее распространенный подход, состоящий в заучивании некоего текста и формул и их пересказе малоэффективен и даже вреден. Эффективным способом изучения является вы-

полнение лабораторных работ на реальном оборудовании, позволяющем сочетать теоретические положения с их практическим использованием. При этом, однако, необходимо следовать вполне определенным правилам выполнения лабораторных работ.

Во-первых, выполнение лабораторной работы должно начинаться докладом студентами следующих положений:

- цели работы, конкретно и неформально определяющие основные направления изучения в данной лабораторной работе;
- задачи работы, определяющие объем измерений и наблюдений и очерчивающие границы конкретной работы; задачи работы нельзя путать с методикой измерений;
- основные теоретические положения лабораторной работы, которые можно свести к прогнозу ожидаемых результатов и обоснованию прогноза; все высказываемые тезисы должны обосновываться сведением к определению величин, к законам электромагнетизма и теории цепей и к очевидным положениям, простой повтор написанных где-то фраз недопустим;
- используемое в работе оборудование, которое имеет прямое отношение к изучаемой дисциплине (принцип работы, устройство, основные узлы, органы управления, порядок работы с оборудованием);
- методика проведения измерений и наблюдений;
- правила техники безопасности при проведении данной лабораторной работы.

Разумеется, формулировать и докладывать все положения должны студенты, роль преподавателя состоит в контроле и корректировке формулируемых идей.

Общим базисом для обсуждения преподавателем и студентами и критерием верности излагаемых тезисов должны быть определения величин, законы электромагнетизма (или, в более общем варианте, законы физики), правила логики и очевидные соображения.

Во-вторых, в любом случае нужно выделять главные, наиболее существенные в данной ситуации моменты, выдвигая их на первое место, и только после главных моментов можно обсуждать второстепенные детали.

В-третьих, при изучении технических объектов и при их обсуждении обязательна последовательность объект – процесс – величина. Наиболее близко к этому требованию лежит последовательность вопросов «что?», «зачем?», «как?», «почему?», то есть сначала характеристика объекта, затем обсуждение целесообразности и необходимости его обсуждения, и только затем обсуждение методик измерения и процедур вычисления. Последний вопрос как наиболее сложный обсуждается не всегда. При обсуждении величин сначала определяется объект, далее сторона объекта, процесс или состояние, подсчитываемое данной величиной, и только потом

вводится их формальное определение. Целесообразно при этом подчеркивать, характеризует ли данная величина объект независимо от его состояния или характеризует только конкретное состояние объекта или конкретный процесс (то есть степень стабильности величины во времени).

В-четвертых, отчетность по лабораторным работам должна быть строго индивидуальная. Неформально признаваемая всеми цель изучения в конкретных ситуациях забывается, заменяясь списыванием, приводящим к полному неумению работать. Отчеты по лабораторной работе должны представляться каждым студентом; отчет должен содержать формулировку целей и задач работы, схемы используемого оборудования, таблицы измерений и наблюдений, нормально оформленные требуемые графики зависимостей и выводы по работе. В последних подчеркиваются основные результаты, полученные в данной работе, и только они, поскольку документ является отчетом по лабораторной работе, а формулировка основного результата (хотя бы в виде ответа на поставленные цели) приучает к выделению главного.

Схожие принципы должны соблюдаться и при проведении экзамена. При подготовке ответа на вопрос билета студент должен составить маленькое сочинение, содержащее введение, основную часть и заключение, и именно в таком варианте докладывать ответ. Во введении формулируется тема обсуждения, перечисляются по пунктам главные моменты основной части, то есть докладывается план ответа (что определяет границы и направление ответа и сразу показывает степень понимания вопроса студентом), дается определение используемых терминов. В заключении повторяются и подчеркиваются главные идеи вопроса. Подобный подход резко снижает возможности и ценность шпаргалок и стимулирует разумный, плановый подход к делу.

Разумеется, основой изучения является доброжелательное отношение между преподавателем и студентами.

# Лекция 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГАЗАХ

## 1.1. Терминология и определения

**Электрическим пробоем** изоляции называют явление потери изоляцией изоляционных свойств при превышении напряжением на изоляции критического значения. Это значение напряжения называют **пробивным напряжением изоляции**  $U_{пр}$ .

Электрическим пробоем диэлектрика называется явление потери диэлектриком изоляционных свойств при превышении напряженностью электрического поля критического значения. **Электрической прочностью диэлектрика**  $E_{пр}$  называют среднее значение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке непосредственно перед пробоем, поскольку проще всего измерять и оценивать именно эту величину:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{S},$$

$S$  – расстояние между электродами.

Атомы и молекулы диэлектрика характеризуются очень сильной связью между собой заряженных частиц, так что в обычном состоянии все заряженные частицы связаны, взаимно компенсируют друг друга и перемещения заряженных частиц на расстояния, сопоставимые с расстоянием между электродами, не происходит. При пробое происходит освобождение заряженных частиц, которые направленно перемещаются под действием сил электрического поля, создавая электрический ток.

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

Электрическая прочность газового промежутка зависит как от расстояния между электродами, так и – в равной степени – от давления и температуры газа. Очень сильно на электрическую прочность изоляционного промежутка – и не только газового промежутка – влияет форма электродов. Кроме того, электрическая прочность сложным образом зависит от скорости нарастания напряжения, определяя возможности пробоя изоляционного промежутка от длительности приложенного напряжения.

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

- изоляционные промежутки с однородным и слабонеоднородным электрическим полем (СНП);
- изоляционные промежутки с резконеоднородным электрическим по-

лем (РНП).

Количественной характеристикой степени однородности поля является **коэффициент неоднородности**  $k_n = \frac{E_{\max}}{E_{cp}}$ , представляющий собой отношение максимального значения напряженности электрического поля в изоляционном промежутке к среднему значению напряженности электрического поля.

К промежуткам с СНП относятся промежутки, у которых  $k_n < 2$ ; это промежутки с электродами типа плоскость – плоскость с закругленными краями или промежутки с электродами типа шар – шар, если радиусы шаров много больше расстояния между их поверхностями.

К промежуткам с РНП относят промежутки, имеющие  $k_n > 3..4$ . Наиболее резко выраженными изоляционными промежутками этого типа являются промежутки с электродами стержень – плоскость.

## 1.2. Виды токов в изоляции и вольтамперная характеристика газового промежутка

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

- емкостные токи при переменном напряжении, которые зависят от емкости изоляции и могут быть большими по величине; способность изоляции проводить емкостные токи характеризуется величиной емкости изоляции;
- абсорбционные токи (токи различных видов замедленной поляризации), сказывающиеся и при постоянном, и при переменном напряжении; характеристикой изоляции в отношении абсорбционных токов являются угол диэлектрических потерь и коэффициент абсорбции, рассматриваемый в разделе 5;
- сквозные токи, чрезвычайно малые по величине, которые протекают при постоянном напряжении через длительное время после его включения; способность изоляции проводить сквозные токи характеризуется величиной сопротивления изоляции.

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



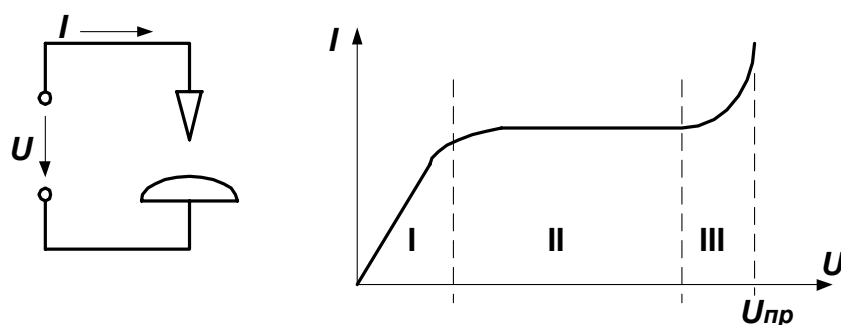


Рис. 1.1. Вольт-амперная характеристика газового промежутка

В газовых изоляционных промежутках при небольших напряжениях выполняется закон Ома (рис. 1.1, область I); при повышении напряжения наступает насыщение, при котором все генерируемые внешними ионизаторами заряженные частицы достигают электродов и роста тока при росте напряжения не происходит (область II), плотность тока при этом составляет примерно  $10^{-15}$  А/м<sup>2</sup> при напряженности поля около 0.6 В/м. Только при больших напряжениях, когда возникает ионизация за счет большой напряженности электрического поля, начинается резкий рост электрического тока (область III), приводящий к независимости разряда от внешних ионизаторов, то есть к его самостоятельности.

### 1.3. Диэлектрические потери и угол потерь

**Любая изоляция нагревается** при приложении к ней напряжения. Причиной нагрева являются сквозные токи через изоляцию, нагрев за счет замедленных видов поляризации, ионизация газовых включений в твердой изоляции и неоднородность структуры изоляции. **Диэлектрическими потерями** называют мощность нагрева изоляции за счет приложенного к ней напряжения. Диэлектрические потери при переменном напряжении обычно существенно больше, чем при постоянном напряжении той же величины, что и действующее значение переменного напряжения, и основную роль в нагреве на переменном напряжении до начала ионизации чаще всего играют поляризационные потери.

**Углом диэлектрических потерь**  $\delta$  называют угол, дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фазы между напряжением на изоляции и током через изоляцию.  $\text{tg } \delta$  показывает соотношение между активной мощностью нагрева изоляции и реактивной емкостной мощностью в изоляции. Понятие угла диэлектрических потерь применимо только для синусоидальных напряжений и токов.

Для определенности понятия емкости реальных конденсаторов или изоляции используют **схемы замещения**. Чаще всего используют две про-

стейшие схемы замещения, составленные емкостным элементом и резистивным элементом: последовательную и параллельную. Величина емкости не зависит от выбора схемы замещения только при малых диэлектрических потерях.

#### 1.4. Механизмы пробоя изоляции

Очень малая концентрация свободных заряженных частиц в диэлектрике приводит к очень малым сквозным токам в изоляции при небольших напряжениях. При пробое концентрация свободных заряженных частиц резко повышается. Это повышение обусловлено следующими шестью группами физических механизмов, из которых для газов имеют значение первые четыре группы.

1. При столкновении нейтрального атома или молекулы с частицей, движущейся с большой скоростью (чаще всего это электрон) может произойти отрыв электрона от нейтрального атома или молекулы с образованием свободного электрона и положительного иона. Этот эффект называется *ударной ионизацией*, и он происходит, если кинетическая энергия ионизирующей частицы превышает энергию, необходимую для отрыва электрона (энергию ионизации),  $W_{кин} \geq W_u$ . При таком процессе концентрация свободных зарядов увеличивается и растет электрический ток. Количество носителей заряда уменьшается не только из-за переноса частиц на электроды, но и из-за явления рекомбинации, то есть нейтрализации иона частицей с противоположным по знаку зарядом.

2. *Фотоионизация в объеме газа* имеет место при воздействии жесткого электромагнитного излучения, к которому относятся ультрафиолетовые лучи, рентгеновское и гамма-излучение. Фотоионизация происходит в случае, если энергия кванта электромагнитного излучения не менее величины энергии ионизации,  $h\nu \geq W_u$ ,  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота электромагнитного излучения.

3. При обычных температурах в диэлектриках не происходит отрыва электронов при тепловых соударениях частиц, поскольку энергии теплового движения даже у самых быстрых частиц недостаточно для ионизации. *Термическая ионизация* при тепловых соударениях становится заметной при температурах в тысячи градусов Цельсия.

4. В ряде случаев происходит *эмиссия электронов с поверхности электродов* (из катода), при которой электроны проникают вглубь диэлектрика. Различают четыре вида эмиссии:

- *термоэлектронная эмиссия* – освобождение электронов из катода при его нагреве; в отличие от термической ионизации требуется сравнительно небольшая температура в несколько сотен градусов;
- *фотоэлектронная эмиссия* – освобождение электронов при облу-

чении катода коротковолновым электромагнитным излучением (эффект Столетова); для многих металлов достаточно облучения видимым светом;

- **автоэлектронная эмиссия** – освобождение электронов из металла за счет высокой напряженности электрического поля порядка  $10^5$  –  $10^6$  В/см, которая может быть реализована на остриях;
- **вторичная электронная эмиссия** – освобождение электронов из катода при бомбардировке его тяжелыми частицами (положительными ионами).

5. Процессы пробоя жидких и твердых диэлектриков отличаются большим разнообразием и сложностью. **В жидких диэлектриках** большое значение имеют **тепловые ионизационные процессы**, то есть нагрев жидкости с ее разложением, приводящий к появлению газовых пузырьков и развитию в них процессов ионизации, поскольку газовые диэлектрики обычно имеют существенно меньшую электрическую прочность. Другим важным фактором пробоя жидкого диэлектрика является **наличие в нем посторонних примесей** (твердых примесей, влаги и газовых пузырьков), вызывающих локальное увеличение напряженности электрического поля.

6. **В твердых диэлектриках** пробой может вызываться как **электрическими процессами** (то есть ударной ионизацией), так и **тепловыми процессами**, возникающими под действием электрического поля. Немалую роль в твердых диэлектриках играют и **электрохимические процессы**, то есть разложение твердого диэлектрика под действием химически активных ионизированных частиц. При электрических процессах сильно различаются электрические прочности диэлектриков однородной и неоднородной структуры. В случае разогрева диэлектрика под действием приложенного электрического поля происходит электротепловой пробой, а при ионизации газовых включений с разложением твердого диэлектрика сравнительно медленно развивается электрохимический пробой.

### 1.5. Пробой газового промежутка с однородным полем

За счет действия внешних ионизаторов в изоляции образуется некоторое число свободных электронов. В качестве таких ионизаторов обычно выступает естественная радиоактивность горных пород и космическое излучение. Если в промежутке появится свободный электрон, то он будет ускоряться электрическим полем, при достаточно большой напряженности поля электрон до соударения приобретет кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации. После первого акта ионизации будет уже два свободных электрона; постоянно возрастающий поток электронов называется **электронной лавиной**. Если после прохождения первой лавины и поглощения заряженных частиц электродами в результате актов вторичной

ионизации появится новый свободный электрон (вторичная и фотоэлектронная эмиссия с катода, фотоионизация в объеме газа), то процесс будет самоподдерживающимся; такой разряд называют самостоятельным разрядом. Для изоляционного промежутка с однородным электрическим полем это означает пробой промежутка.

Пробивное напряжение газового промежутка с однородным (ОП) и слабонеоднородным (СНП) электрическим полем зависит как от расстояния между электродами, так и от давления и температуры газа. Эта зависимость определяется **законом Пашена**, согласно которому пробивное напряжение газового промежутка с ОП и СНП определяется произведением относительной плотности газа  $\delta$  на расстояние между электродами  $S$ ,  $U_{пр} = f(\delta S)$ . Относительной плотностью газа называют отношение плотности газа в данных условиях к плотности газа при нормальных условиях (20° С, 760 мм рт. ст.).

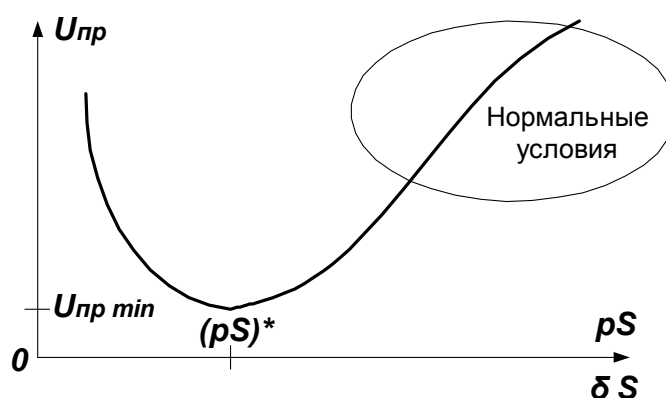


Рис. 1.2. Вид зависимости закона Пашена

Первоначально закон был сформулирован для зависимости пробивного напряжения от расстояния между электродами и давления газа, при постоянстве температуры обе зависимости аналогичны. Характер зависимости показан на рис. 1.2. Значение  $(pS)^*$  для нормальной температуры равно 0.57 см·мм рт. ст., так что нормальные давления соответствуют области, отображенной овалом на рис. 1.2. В этой области зависимость  $U_{пр} = f(\delta S)$  хорошо аппроксимируется выражением  $U_{пр} = a\delta S + b\sqrt{\delta S}$ ,  $a$  и  $b$  — константы; в частном случае для воздуха  $U_{пр} = 24.5\delta S + 6.4\sqrt{\delta S}$ , если  $U_{пр}$  — в киловольтах,  $S$  — в сантиметрах.

### 1.6. Особенности пробоя газового промежутка с резконеоднородным электрическим полем

В промежутке типа стержень — плоскость (С-П) напряженность электрического поля у острия существенно больше средней напряженности по-

ля в промежутке. При сравнительно небольшой средней напряженности поля у острия напряженность настолько велика, что там может происходить ударная ионизация с развитием электронных лавин и образованием проводящих каналов – стримеров. Обладающие большой подвижностью **отрицательные свободные электроны** ответственны за образование новых заряженных частиц, а остающиеся после ионизации малоподвижные положительные ионы меняют распределение электрического поля в промежутке. Поскольку **ионизация начинается всегда у острия**, то при его положительной полярности **положительный объемный заряд** (ПОЗ) экранирует острие и затрудняет развитие ионизационных процессов вблизи острия, облегчая в то же время развитие разряда в оставшемся промежутке между ПОЗ и отрицательной плоскостью. При отрицательном острие ПОЗ вблизи него резко интенсифицирует ионизацию вблизи острия, затрудняя развитие разряда в промежутке ПОЗ – положительная плоскость. Перечисленные факторы определяют основные отличия закономерностей пробоя промежутка С-П от промежутка с однородным и слабонеоднородным электрическим полем, которые сводятся к следующему:

- **электрическая прочность** промежутка С-П существенно меньше электрической прочности промежутка с однородным и слабонеоднородным электрическим полем; так, при нормальных условиях электрическая прочность воздуха при расстояниях между электродами порядка десятков сантиметров составляет примерно 30 кВ/см для однородного поля и снижается до единиц киловольт на сантиметр для промежутка С-П;
- при сравнительно небольших напряженностях электрического поля в промежутке С-П наблюдается **явление короны**, то есть самостоятельного электрического разряда вблизи стержня, сопровождающегося свечением и потрескиванием, при котором только часть промежутка становится проводящей, а промежуток в целом сохраняет изоляционные свойства;
- **напряжение начала короны зависит от полярности стержня**; при отрицательном стержне корона начинается при существенно меньшем напряжении, чем при положительном острие;
- **эффект полярности наблюдается и при пробое** промежутка С-П: при положительном стержне напряжение пробоя в 2 – 2.5 раза меньше, чем при отрицательном стержне.

### 1.7. Пробой газового промежутка при импульсном напряжении

При кратковременном приложении напряжения, когда время приложения напряжения сопоставимо со временем развития пробоя, процесс пробоя изменяется с изменением пробивного напряжения, что отличает эту

ситуацию от медленно нарастающего напряжения. Пробивное напряжение зависит от скорости подъема напряжения на изоляционном промежутке, поскольку вначале требуется некоторое время для достижения статического пробивного напряжения, затем требуется время на появление первого эффективного электрона, с которого начинается развитие пробоя, и затрачивается какое-то время на формирование канала разряда. Все составляющие предразрядного времени зависят от скорости подъема напряжения и, в общем, от формы импульса напряжения. **Разрядное напряжение оказывается связанным с предразрядным временем**, и эта зависимость называется вольт-секундной характеристикой изоляционного промежутка.

Кратковременные повышения напряжения происходят при разрядах молнии в оборудование или при близких разрядах молнии. Для обеспечения защиты оборудования от перенапряжений с помощью защитного разрядного промежутка требуется, чтобы при быстром подъеме напряжения пробивался защитный промежуток. Вольт-секундные характеристики изоляции оборудования определяют при параметрах импульса, близких к средним параметрам грозовых перенапряжений. Эти параметры определяются ГОСТ 1516.2-97, а соответствующий импульс называется **стандартным грозовым импульсом**. Определение характеристик изоляции на стандартном грозовом импульсе обеспечивает сопоставимость результатов испытаний и возможности защиты изоляции от грозовых перенапряжений.

ГОСТ 1516.2-97 определяет время нарастания импульса напряжения и длительность импульса. Для выделения наиболее значимой части импульса на его фронте (рис. 1.3) проводят прямую линию через точки, соответствующие 0.3 и 0.9 амплитуды импульса и по пересечению этой линией оси абсцисс и линии максимального значения импульса определяют длительность фронта  $\tau_{\phi}$ , а по времени достижения спада импульса до половины максимального значения определяют длительность импульса  $\tau_u$ . Для стандартного грозового импульса  $\tau_{\phi}=1.2 \text{ мкс} \pm 30\%$ ,  $\tau_u=50 \text{ мкс} \pm 20\%$ .

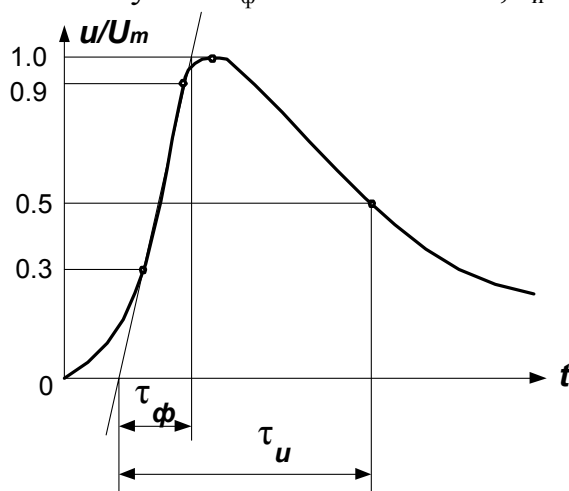


Рис. 1.3. Определение параметров аperiodического импульса

Вольт-секундные характеристики имеют особое значение в вопросах защиты оборудования от перенапряжений, когда защитными элементами служат искровые промежутки, вентильные и трубчатые разрядники. При воздействии грозových перенапряжений факт пробоя защитного промежутка или защищаемой изоляции определяется видом вольт-секундных характеристик и их взаимным пересечением (рис. 1.4).

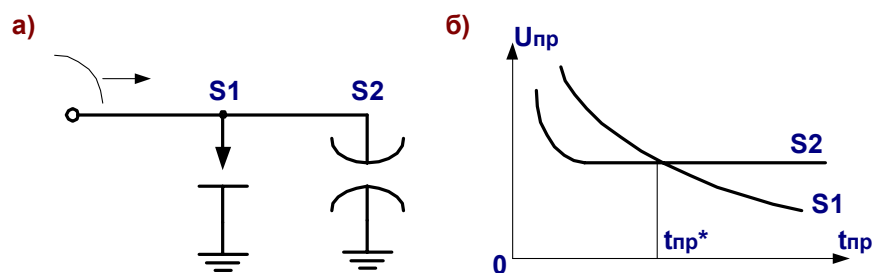


Рис. 1.4. Вольт-секундные характеристики промежутков разных типов

*Вольт-секундные характеристики промежутков с однородным и слабонеоднородным электрическим полем имеют более пологий вид* по сравнению с промежутками с резконеоднородным полем. Защитный промежуток S1 (рис. 1.4) не обеспечит защиту изоляции S2 при предразрядных временах менее  $t_{пр}^*$ , хотя на частоте 50 Гц пробивное напряжение S1 может быть меньше, чем у S2.

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

## 1.8. Перекрытие изоляции

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

Газовые включения между твердой изоляцией и металлом электродов характеризуются повышенной напряженностью электрического поля в газовом включении, определяемой условиями на границе раздела твердый диэлектрик – воздух (рис. 1.5а):

$$\frac{E_{ТД}}{E_B} = \frac{\epsilon_{rB}}{\epsilon_{rТД}},$$

и, поскольку диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика больше, чем диэлектрическая проницаемость воздуха, постольку напряженность поля в воздухе больше напряженности поля в твердом диэлектрике. Ионизация в газовых включениях начинается при сравнительно небольшом напряжении, продукты ионизации выходят на боковую поверхность, накапливаются там, повышают напряженность электрического поля в оставшемся промежутке и облегчают разряд.

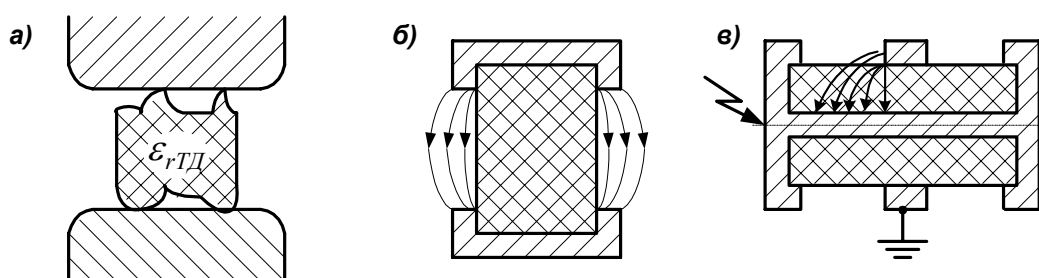


Рис. 1.5. Влияние воздушных включений и структура электрического поля

Наличие микрокапель влаги приводит к повышению напряженности поля на краях капель и к перекрытию промежутков между ними при меньшем напряжении, чем при сухой поверхности.

Для увеличения  $U_{пер}$  применяют ребристые конструкции изоляторов, увеличивающие разрядный путь.

В опорном изоляторе (рис. 1.5б) электрическое поле часто неоднородно, что дополнительно снижает разрядные напряжения.

**Напряжение перекрытия проходного изолятора** (рис. 1.5в) обычно в несколько раз меньше напряжения перекрытия опорного изолятора при одинаковой длине пути перекрытия. Связано это с близким расстоянием между разнопотенциальными электродами в проходном изоляторе и большой составляющей напряженности электрического поля, перпендикулярной поверхности твердой изоляции, из-за чего ионизация на фланце изолятора начинается при весьма небольшом напряжении. Большая емкость между каналом разряда и близким внутренним электродом приводит к сравнительно большому емкостному току между каналом разряда и внутренним электродом, что приводит к нагреву канала и большей его стабильности.

## РЕЗЮМЕ

Превышение напряжения на изоляции выше критического значения приводит к пробое изоляции. Значение пробивного напряжения зависит от



свойств изоляционного материала, структуры электрического поля в изоляционном промежутке и скорости нарастания пробивного напряжения на промежутке.

Пробой изоляции происходит из-за явлений ударной ионизации, фотоионизации в объеме газа, термической ионизации, эмиссии электронов из катода. В жидкостях особое значение имеют тепловые процессы и наличие примесей, в твердой изоляции при пробое происходят электрические, тепловые и электрохимические процессы.

Пробивное напряжение газового промежутка с однородным и слабонеоднородным электрическим полем зависит от произведения относительной плоскости газа на расстояние между электродами. Эта зависимость характеризуется снижением электрической прочности при увеличении расстояния между электродами при условиях, близких к нормальным и имеет минимум при очень низких давлениях или очень малых расстояниях между электродами.

Разрядный промежуток с электродами типа стержень – плоскость характеризуется существенно меньшей электрической прочностью по сравнению с промежутком с однородным и слабонеоднородным электрическим полем, наличием явления короны и двойным эффектом полярности. При отрицательном стержне корона начинается при существенно меньшем напряжении, чем при положительном, а пробивное напряжение при положительном стержне меньше, чем при отрицательном.

При быстром подъеме напряжения разрядное напряжение оказывается связанным с предразрядным временем, эта зависимость называется вольт-секундной характеристикой изоляционного промежутка. Вольт-секундная характеристика определяется на стандартных грозовых импульсах.

Напряжение перекрытия проходных изоляторов существенно меньше напряжения перекрытия опорных изоляторов при одинаковой длине пути перекрытия.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение пробоя и приведите основные величины, его характеризующие.
2. Приведите отличия понятий «пробой диэлектрика» и «пробой изоляции» и отличия их количественных характеристик.
3. Перечислите механизмы пробоя диэлектриков.
4. Сформулируйте закон Пашена. Каковы причины такой зависимости?
5. Почему существует зависимость разрядного напряжения от предразрядного времени?
6. Каковы параметры стандартного грозового импульса?

## 7. Что такое «вольт-секундная характеристика»?

# Лекция 2. ИЗОЛЯТОРЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

## 2.1. Основные характеристики изоляторов

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

*По расположению токоведущей части* различают опорные, проходные и подвесные изоляторы, назначение которых прямо определяются их названиями. *По конструктивному исполнению* изоляторы делятся на тарельчатые (изоляционная часть в форме тарелки), стержневые (изоляционная часть в виде стержня или цилиндра) и штыревые (изолятор имеет металлический штырь, несущий основную механическую нагрузку). *По месту установки* различают линейные изоляторы, используемые для подвески проводов линий электропередачи и контактной сети, и станционные изоляторы, используемые на электростанциях, подстанциях (в том числе и тяговых) и постах секционирования. В последнем плане одни и те же типы изоляторов, например, подвесные тарельчатые, могут быть и линейными, и станционными.

*Основными характеристиками изоляторов* являются разрядные напряжения, геометрические параметры и механические характеристики, а также номинальное напряжение электроустановки, для которой предназначен изолятор.

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

- *сухоразрядное напряжение*  $U_{\text{схр}}$  – напряжение перекрытия чистого сухого изолятора при напряжении частотой 50 Гц (эффективное значение напряжения);
- *мокроразрядное напряжение*  $U_{\text{мкр}}$  – напряжение перекрытия чистого изолятора, смоченного дождем, падающим под углом  $45^\circ$  к вертикали, при напряжении частотой 50 Гц (эффективное значение напряжения);
- *импульсное разрядное напряжение*  $U_{\text{имп}}$  – пятидесятипроцентное напряжение перекрытия стандартными грозowymi импульсами (амплитуда импульса, при которой из десяти поданных на изолятор импульсов пять завершаются перекрытием, а оставшиеся пять не приводят к перекрытию);

- **пробивное напряжение**  $U_{пр}$  – напряжение пробоя изоляционного тела изолятора на частоте 50 Гц; редко используемая характеристика, поскольку пробой вызывает необратимый дефект изолятора и напряжение перекрытия должно быть меньше пробивного напряжения.

У подвесных тарельчатых изоляторов мокроразрядное напряжение в 1,8..2 раза меньше сухоразрядного напряжения. Эти изоляторы спроектированы так, чтобы в сухом состоянии пробивное напряжение превышало напряжение перекрытия примерно в 1.6 раза, что обеспечивает отсутствие пробоя при перенапряжениях. У стержневых изоляторов различие мокроразрядного и сухоразрядного напряжения не столь велико, порядка 15..20%. Импульсное разрядное напряжение практически не зависит от увлажнения и загрязнения изолятора и обычно примерно на 20% больше амплитуды сухоразрядного напряжения. Загрязнения на поверхности изолятора сильно снижают мокроразрядное напряжение изолятора.

К геометрическим параметрам относят следующие:

- **строительная высота**  $H_c$ , то есть габарит, который изолятор занимает в конструкции после его установки; у некоторых изоляторов, например, у тарельчатых подвесных, строительная высота меньше реальной высоты изолятора;
- **наибольший диаметр**  $D$  изолятора;
- **длина пути утечки** по поверхности изолятора  $l_y$ ;
- **кратчайшее расстояние между электродами по воздуху**  $l_c$  (сухоразрядное расстояние), от которого зависит сухоразрядное напряжение;
- **мокроразрядное расстояние**  $l_m$ , определяемое в предположении, что часть поверхности изолятора стала проводящей из-за смачивания дождем, падающим под углом  $45^\circ$  к вертикали.

Длина пути утечки изолятора нормируется ГОСТ 9920-89 для различных категорий исполнения и в зависимости от степени загрязненности атмосферы (табл. 2.1). Эффективной длиной пути утечки называют длину пути, по которому развивается разряд по загрязненной поверхности изолятора. В табл. 2.2 приведена характеристика степени загрязненности атмосферы, а в табл. 2.3 – длина пути утечки изоляции для напряжения 27.5 кВ по «Правилам устройства и технической эксплуатации контактной сети».

Таблица 2.1

Нормированные эффективные длины пути утечки внешней изоляции электрооборудования

Категория исполнения изоляции	Степень загрязненности атмосферы	Удельная эффективная длина пути утечки, см/кВ, не менее, при номинальном напряжении $U_{ном}$ , кВ	
		6-35	110-750
А	1,2,3	1.9-2.2	1.4-1.9
Б	3,4,5	2.2-3.0	1.8-2.6

Категория исполнения изоляции	Степень загрязненности атмосферы	Удельная эффективная длина пути утечки, см/кВ, не менее, при номинальном напряжении U ном, кВ	
		6-35	110-750
В	5,6	3.0-3.5	2.6-3.1

Таблица 2.2

Характеристика участков железных дорог по степени загрязненности атмосферы

Степень загрязненности атмосферы	Характеристика железнодорожных участков
III	Участки железных дорог со скоростями движения до 120 км/ч при отсутствии характеристик, указанных для IV-VII СЗА
IV	<p>Вблизи (до 500 м) мест добычи, постоянной погрузки и выгрузки угля; производства цинка, алюминия; ТЭС, работающих на сланцах и углях с зольностью свыше 30 %.</p> <p>С перевозками в открытом виде угля, сланца, песка, щебня организованными маршрутами.</p> <p>Со скоростями движения поездов 120-160 км/ч. Проходящие по местности с сильнозасоленными и дефлирующими почвами или вблизи (до 1 км) морей и соляных озер со средnezасоленной водой (10-20 г/л) или далее 1 км (до 5 км) с сильнозасоленной водой (20-40 г/л).</p>
V	<p>Вблизи (до 500 м) мест производства, постоянной погрузки и выгрузки цемента.</p> <p>Со скоростями движения поездов более 160 км/ч.</p> <p>Проходящие по местности с очень засоленными и дефлирующими почвами или вблизи (до 1 км) морей и соленых озер с сильнозасоленной водой (20-40 г/л).</p> <p>В тоннелях со смешанной ездой на тепловозах и электровозах.</p>
VI	<p>Вблизи (до 500 м) мест расположения предприятий нефтехимической промышленности, постоянной погрузки, выгрузки ее продукции.</p> <p>Места постоянной стоянки и остановки работающих тепловозов.</p> <p>В промышленных центрах с интенсивным выделением смога.</p>
VII	Вблизи (до 500 м) мест расположения градирен, предприятий химической промышленности и по производству редких металлов, постоянной погрузки и выгрузки минеральных удобрений и продуктов химической промышленности.

Таблица 2.3

Нормированная минимальная длина пути утечки для изоляции переменного тока 27.5 кВ

Вид изоляции	Минимальная длина пути утечки тока для районов с результирующей СЗА, мм				
	III	IV	V	VI	VII
Подвесные и врезные (кроме анкерных) стержневые изоляторы фарфоровые, сборные, стеклянные и полимерные (ребристая поверхность) или гирлянды из тарельчатых изоляторов	800	950	1100	1300	1500
Изоляторы с гладкими полимерными защищенными чехлами или покрытиями	750	800	900	1050	1200

Основными *механическими характеристиками* изоляторов являются три следующие характеристики:

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

Измеряют минимальную разрушающую силу в деканьютонах (даН), что почти совпадает с килограммом силы, или в килоньютонах (кН).

*Изготавливают* изоляторы из электротехнического фарфора, закаленного электротехнического стекла и полимерных материалов (кремнийорганическая резина, стеклопластик, фторопласт).

## 2.2. Линейные и станционные изоляторы

Изоляторы воздушных линий электропередачи чаще всего бывают тарельчатые, штыревые и стержневые. Наиболее распространены тарельчатые изоляторы, одна из возможных конструкций которого показана на рис. 2.1. Для повышения надежности изоляции и повышения разрядных напряжений тарельчатые изоляторы соединяют в гирлянды. Узел крепления у тарельчатых изоляторов выполнен шарнирным, поэтому на изолятор действует только растягивающая сила.

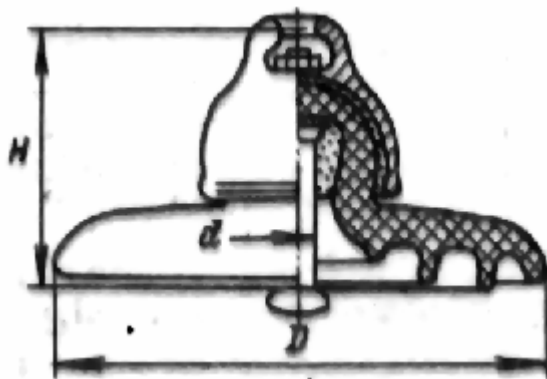


Рис. 2.1. Эскиз изолятора ПФ-70А

*Стержневые изоляторы* изготавливают из высокопрочного фарфора и из полимерных материалов (рис. 2.2).

*Механическая прочность* фарфоровых стержневых изоляторов меньше, чем у тарельчатых, поскольку фарфор в стержневых изоляторах работает на растяжение, а иногда и на изгиб, а в тарельчатых – на сжатие внутри чугунной шапки изолятора.

Несущей конструкцией *полимерного изолятора* обычно является

стеклопластиковый стержень, имеющий слабую дугостойкость. Этот стержень закрывают ребристым чехлом из кремнийорганической резины или фторопласта, которые обладают отталкивающими свойствами к влаге и загрязнениям.

**Штыревые изоляторы** крепятся на опоре с помощью металлического штыря или крюка (рис. 2.3). Из-за большого изгибающего усилия на такой изолятор применяют штыревые изоляторы на напряжения не выше 35 кВ.

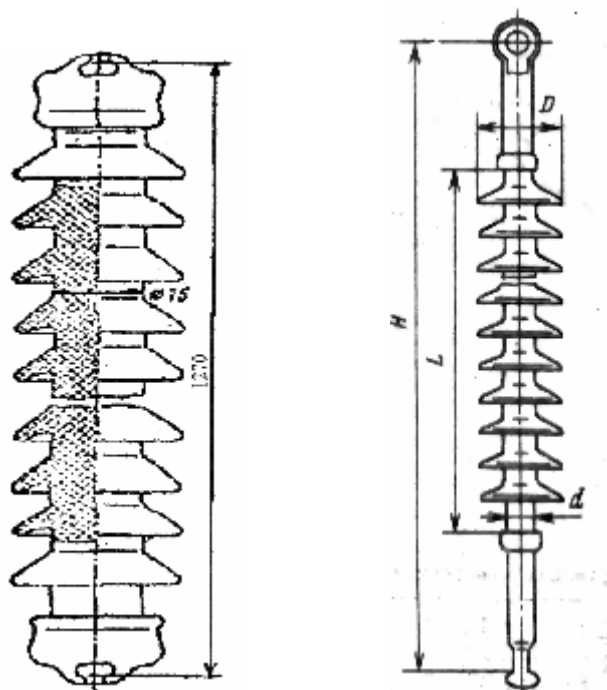


Рис. 2.2. Стержневой фарфоровый и стержневой полимерный изоляторы

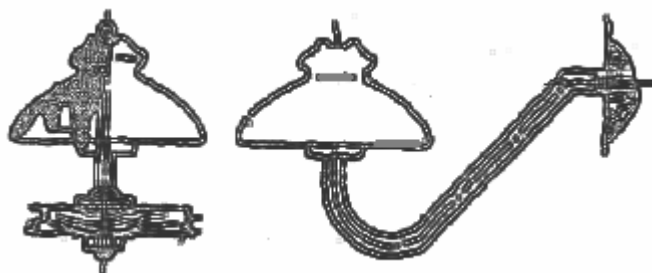


Рис. 2.3. Изолятор ШФ-10В

**На контактной сети** электрифицированной железной дороги используется большое количество разновидностей изоляторов. По месту установки изолятора и по конструкции можно выделить **шесть подгрупп** изоляторов:

- подвесные изоляторы, которых больше всего;
- фиксаторные изоляторы, используемые для изоляции фиксаторных узлов;

- консольные изоляторы, которые используют в изолированных консолях и которые могут быть тех же марок, что и фиксаторные;
- секционирующие изоляторы – особый вид изоляторов, используемых в конструкциях секционных изоляторов (секционные изоляторы, собственно, изоляторами уже не являются, это сборные конструкции для секционирования контактной сети);
- штыревые изоляторы, используемые для крепления проводов линий продольного электроснабжения, располагаемых на опорах контактной сети;
- опорные изоляторы, используемые в мачтовых разъединителях.

В табл. 2.4 приведены характеристики нескольких распространенных видов изоляторов.

Таблица 2.4

Основные характеристики некоторых типов изоляторов

Тип	Hс, мм	D, мм	l <sub>ут</sub> , мм	U <sub>схр</sub> , кВ	U <sub>мкр</sub> , кВ	Разрушающая сила, кН		
						растяж.	сжатие	изгиб
Стержневые фарфоровые								
VKL-60/7	544	120	-	140	100	80	-	2
ИКСУ-27.5	565	195	-	140	110	60	-	5.2
Штыревые фарфоровые								
ШФ-10А	105	140	215	60	34	-	-	14
ШФ-10Г	140	146	265	100	42	-	-	12.5
Штыревые стеклянные								
ШС-10А	110	150	210	60	34	-	-	14
Полимерные ребристые из кремнийорганической резины								
НСК-120/27.5	350	115	950	140	100	120	-	-
ФСК-70/0.9	540	150	950	140	100	70	-	4
ОСК-70/0.9	440	150	950	140	100	70	200	5
Стеклопластиковый стержень, покрытый фторопластовой защитной трубкой								
НСФТ-120/1.2	1514	14	1200	-	215	90	-	-
Тарельчатые фарфоровые								
ПФ-70А	146	255	303	70	40	70	-	-
ПФГ-60Б	125	270	375	70	40	60	-	-
Тарельчатые стеклянные								
ПС-70Д	146	255	303	-	40	70	-	-

В качестве *станционных изоляторов* используются опорные изоляторы, в основном стержневого типа, проходные изоляторы разных типов и подвесные изоляторы (гирлянды тарельчатых изоляторов).

### 2.3. Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов

Гирлянда изоляторов, составленная из подвесных тарельчатых изоляторов, является одной из наиболее часто встречающихся видов изоляции

проводов воздушных линий и контактной сети. Напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов, *распределяется неравномерно*, и на разные изоляторы приходится разные доли напряжений, что снижает напряжение начала короны и напряжение перекрытия гирлянды. В наиболее неблагоприятной ситуации оказывается изолятор, ближайший к проводу.

**Основной причиной** неодинаковых напряжений на изоляторах можно считать наличие паразитных емкостей металлических частей изоляторов по отношению к земле (рис. 2.4). В гирлянде можно различить три вида емкостей: собственные емкости изоляторов  $C_0$ , емкости металлических частей по отношению к земле  $C_1$  и емкости по отношению к проводу  $C_2$ . Порядок величин емкостей примерно таков:  $C_0 \approx 50$  пФ,  $C_1 \approx 5$  пФ,  $C_2 \approx 0.5$  пФ.

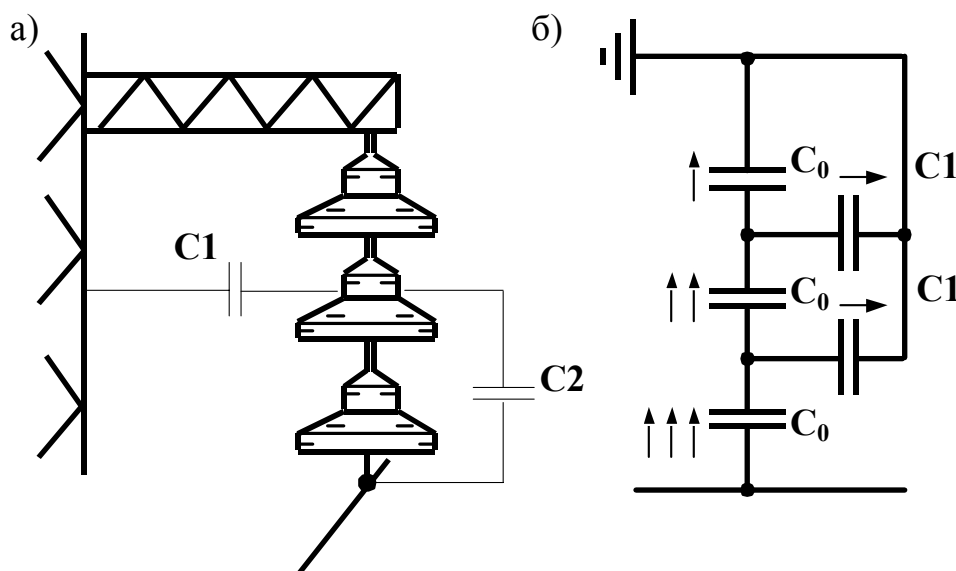


Рис. 2.4. Гирлянда изоляторов и схема замещения гирлянды

В первом приближении емкостью изоляторов по отношению к проводу можно пренебречь, и тогда схема замещения гирлянды сухих изоляторов выглядит как на рис. 2.4,б. При переменном напряжении по емкостным элементам протекает емкостный ток, и ток первого снизу изолятора разветвляется на ток емкостного элемента по отношению к земле и ток оставшейся части гирлянды. Через второй снизу изолятор течет емкостный ток меньшей величины, и падение напряжения максимально на нижнем, ближайшем к проводу изоляторе, который находится в наихудших условиях. При числе изоляторов больше трех-четырех минимальное напряжение приходится, однако, не на самый верхний изолятор. Наличие емкостей  $C_2$  приводит к некоторому выравниванию неравномерности падений напряжения и минимальное напряжение оказывается на втором-третьем (или далее, в зависимости от числа изоляторов в гирлянде) изоляторе сверху. На



рис. 2.5 показано распределение напряжения на гирлянде из 22 изоляторов линии 500 кВ; на один изолятор приходится от 9 до 29 кВ при среднем значении 13 кВ.



Рис. 2.5. Доля напряжения на изоляторах в гирлянде из 22 изоляторов

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

### РЕЗЮМЕ

Среди изоляторов по расположению токоведущей части различают опорные, проходные и подвесные изоляторы, по конструктивному исполнению различают тарельчатые, стержневые и штыревые изоляторы, а по месту установки различают линейные и станционные изоляторы.

К основным характеристикам изоляторов относят номинальное напряжение, разрядные напряжения, геометрические параметры и механические характеристики.

На контактной сети используются подвесные изоляторы, фиксаторные изоляторы, консольные изоляторы, секционирующие изоляторы, штыревые изоляторы и опорные изоляторы.

Напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов, распределяется неравномерно, и наибольшее напряжение оказывается на изоляторе, ближайшем к проводу.

### Контрольные вопросы

1. Приведите классификации изоляторов.
2. Назовите основные группы параметров изоляторов и отдельные их характеристики.
3. Опишите конструктивные особенности отдельных изоляторов

контактной сети и тяговых подстанций.

4. В чем причина неравномерного распределения напряжения по гирлянде изоляторов?

## Лекция 3. ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

### 3.1. Изоляция силовых трансформаторов

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

Изоляцию обмоток разделяют на главную и продольную. **Главная изоляция** составлена изоляцией между обмотками, между обмотками и магнитопроводом, междуфазной изоляцией между наружными катушками двух соседних стержней и изоляцией наружной катушки от стенки бака. К **продольной изоляции** относят изоляционные промежутки между витками, между слоями витков и между катушками одной обмотки. Габариты главной и продольной изоляции при напряжениях до 220 кВ включительно определяются грозowymi перенапряжениями. Конструкция изоляции должна обеспечивать охлаждение активных частей трансформатора.

Главная изоляция выполняется преимущественно **маслобарьерного типа**, обладающая высокой импульсной электрической прочностью и обеспечивающая интенсивное охлаждение обмоток и магнитопровода. Эта изоляция представляет собою трансформаторное масло с барьерами из электротехнического картона. Общий вид такой изоляции показан на рис. 3.1. Набор барьеров составляют из трех основных видов: цилиндрический барьер, плоская шайба и угловая шайба.

Барьеры разделяют один большой масляный промежуток на несколько меньших, что увеличивает общее пробивное напряжение. Для наибольшего эффекта барьеры должны располагаться перпендикулярно силовым линиям электрического поля.

**Для обеспечения циркуляции масла** и отвода тепла сооружают масляные каналы двух основных видов (рис. 3.2):

- вертикальные каналы между цилиндрическими барьерами и между барьерами и обмоткой с помощью вертикальных реек;
- горизонтальные каналы между витками с помощью горизонтальных прокладок, которые служат одновременно для крепления вертикальных реек.

Характерное строение главной изоляции трансформаторов напряжением 35 кВ и 110 кВ показано на рис. 3.3.

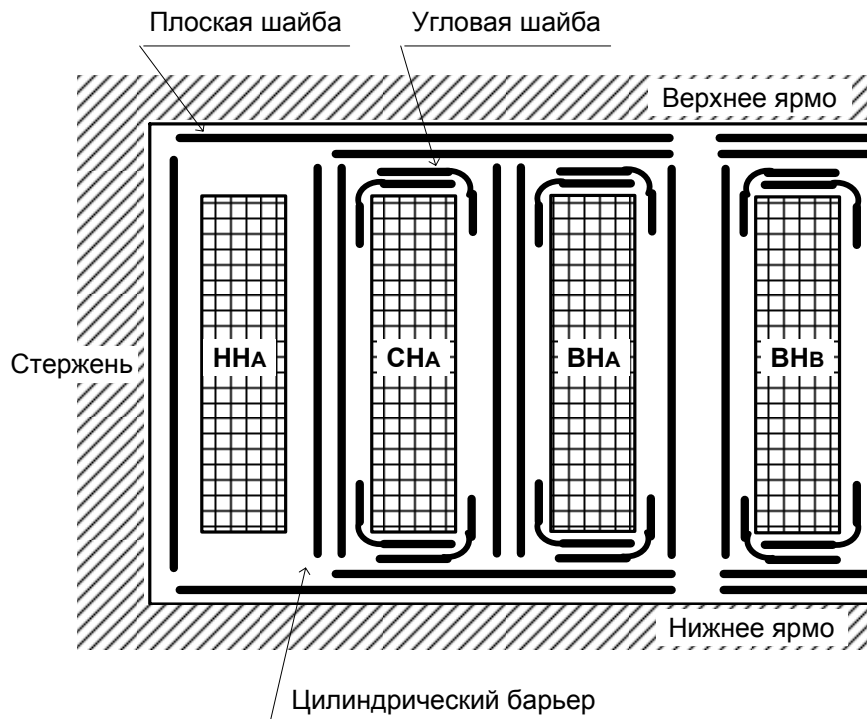


Рис. 3.1. Общий вид главной изоляции обмоток трансформаторов

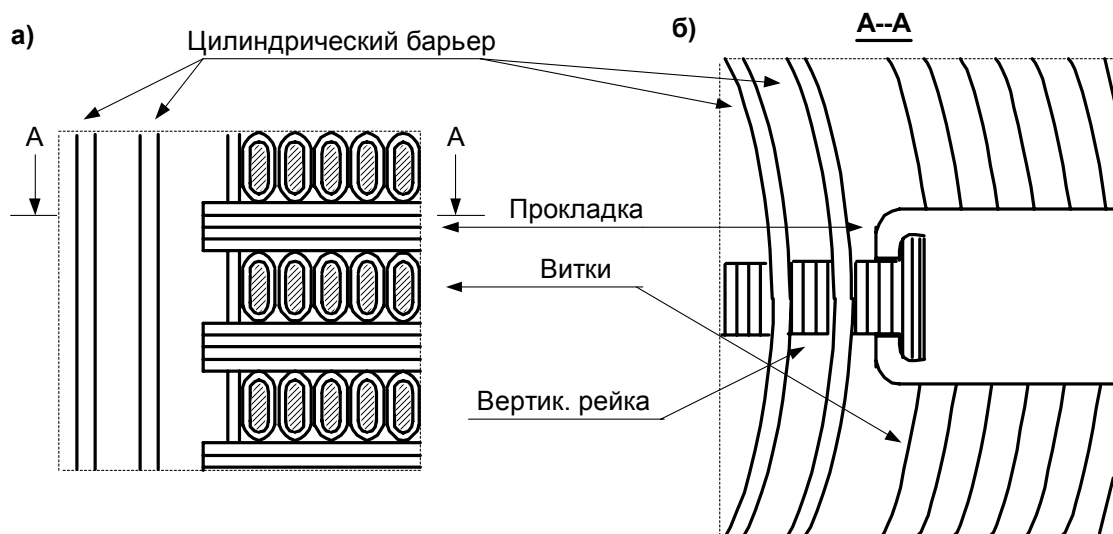


Рис. 3.2. Вертикальное (а) и горизонтальное (б) сечение масляных каналов

В трансформаторах 220 кВ и выше часто делают ввод в середину катушки, что приводит к уменьшению напряжения на краях катушки.

**Продольная изоляция** силовых трансформаторов выполняется обычно слоями электроизоляционной бумаги, накладываемой поверх провода.

В маслбарьерной изоляции **электрически наиболее нагруженными** оказываются прослойки масла, поскольку диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  электрокартона составляет примерно 4, а у масла  $\epsilon_r \approx 2.2$ , к тому же

электрическая прочность масла в 3-4 раза меньше электрической прочности пропитанного электрокартона.

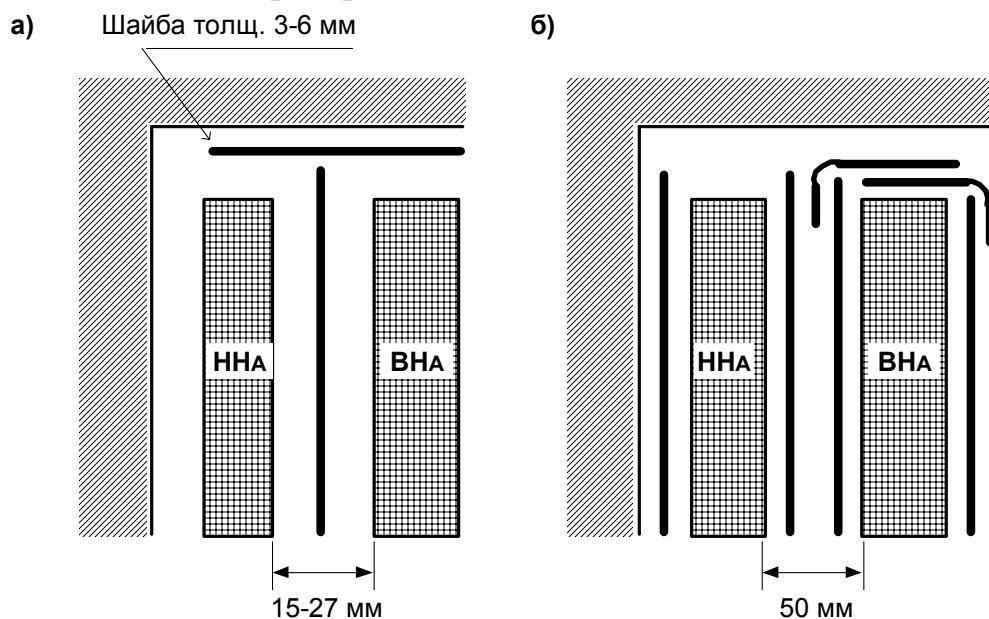


Рис. 3.3. Главная изоляция трансформаторов 35 кВ (а) и 110 кВ (б)

Нарушение маслосборной изоляции начинается с пробоя масляного канала без полного пробоя изоляции, при этом в месте пробоя образуются необратимые повреждения электрокартона или бумаги, снижающие ее электрическую прочность. Чтобы этого не происходило, в масляном канале рабочие напряженности электрического поля принимают от 2.5 кВ/мм до 5 кВ/мм в первом масляном канале, где напряженность поля наибольшая.

### 3.2. Изоляция вводов высокого напряжения

Проходные изоляторы высокого напряжения, называемые иначе вводами, имеют *неблагоприятное расположение электродов* с большой напряженностью электрического поля. Наибольшая напряженность электрического поля наблюдается у края фланца изолятора (рис. 3.4), где велики и нормальная к поверхности изолятора составляющая напряженности электрического поля, и тангенциальная составляющая. В этом месте возможно возникновение короны, скользящих разрядов, приводящих к перекрытию и к радиальным пробоям. Довольно часто при эксплуатации появляются наиболее опасные *механические нагрузки на изгиб* изолятора. Кроме того, на изолятор воздействуют *тепловые нагрузки* за счет нагрева токоведущих частей и диэлектрических потерь в изоляционном теле.

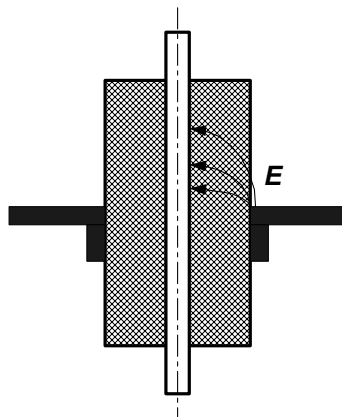


Рис. 3.4. Схематическое изображение проходного изолятора

Для создания более равномерного электрического поля используются конструкции *конденсаторного типа*, в которых требуемое распределение напряжения по изоляционной конструкции принудительно осуществляется при помощи металлических обкладок, закладываемых в изоляцию в процессе ее намотки (рис. 3.5). Такая конструкция уменьшает требуемые размеры ввода, особенно его диаметр, что *улучшает условия отвода тепла*. Чаще всего изоляторы конденсаторного типа выполняются так, чтобы обеспечить *постоянство аксиальной* (продольной) составляющей напряженности электрического поля. Для этого толщину слоя изоляции выбирают так, чтобы обеспечить одинаковые емкости между обкладками и одинаковые напряжения на каждом слое; уступы также принимаются одинаковыми. Иногда, однако, выполняют одинаковую толщину слоев.

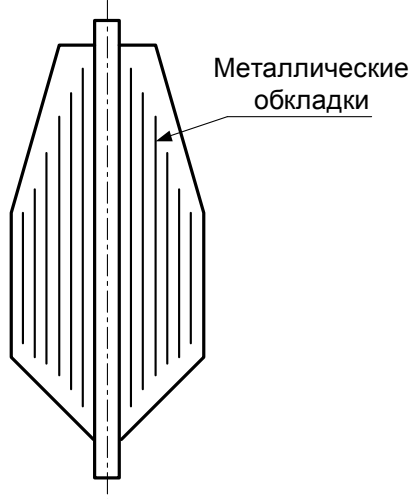


Рис. 3.5. Эскиз проходного изолятора конденсаторного типа

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

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

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

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

**Для повышения тепловой устойчивости** ввода увеличивают площадь сечения стержня и улучшают качество изоляции снижением тангенса угла диэлектрических потерь.

### 3.3. Изоляция силовых конденсаторов

Силовые конденсаторы **применяют** в следующих случаях:

- в силовых сетях промышленной частоты высокого и низкого напряжений частотой 50 Гц (косинусные конденсаторы, конденсаторы продольной емкостной компенсации, конденсаторы емкостного отбора мощности);
- в силовых установках повышенных частот (электротермические установки частотой до 10 кГц);
- в установках постоянного и пульсирующего напряжений;
- в установках импульсного напряжения.

Основное **характерное отличие силовых конденсаторов** от прочих конденсаторов – сравнительно большие протекающие через них токи, которые даже при малых диэлектрических потерях приводят к заметному нагреву конденсаторов. **Основные проблемы**, решаемые при проектировании и изготовлении конденсаторов, заключаются в обеспечении требуемой емкости, рабочего напряжения и тепловой устойчивости. Все это определяется изоляцией конденсатора: диэлектрической проницаемостью диэлектрика, допустимой величиной рабочей напряженности электрического поля, диэлектрическими потерями и условиями теплоотвода.

Силовые конденсаторы состоят **из секций** в основном рулонного ти-

па. Секции наматывают на цилиндрическую оправку и после снятия с оправки сплющивают, либо оставляют на цилиндрическом изоляционном каркасе, получая цилиндрическую секцию. В зависимости от номинального напряжения и емкости конденсатора его секции соединяются параллельно, последовательно или смешанно (рис. 3.6). Пакет помещают в корпус, пропитывают и герметизируют для предотвращения попадания воздуха и влаги.

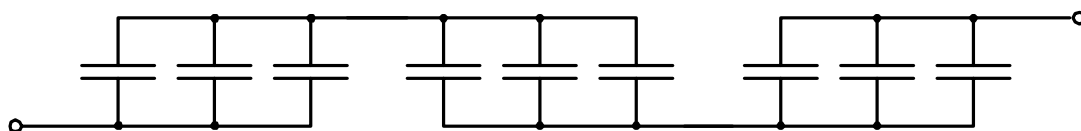


Рис. 3.6. Смешанное параллельно-последовательное соединение секций

Секции конденсаторов выполняются либо *со скрытой*, либо *с выступающей фольгой* (рис. 3.7). Конструкцию с выступающей фольгой применяют для улучшения теплоотвода и для уменьшения индуктивности секций. Для увеличения напряжения применяют *конструкцию со «слепой» промежуточной фольгой*, при этом секция состоит из нескольких подсекций, соединенных последовательно, а выводы имеют только первая и последняя фольга (рис. 3.7г).

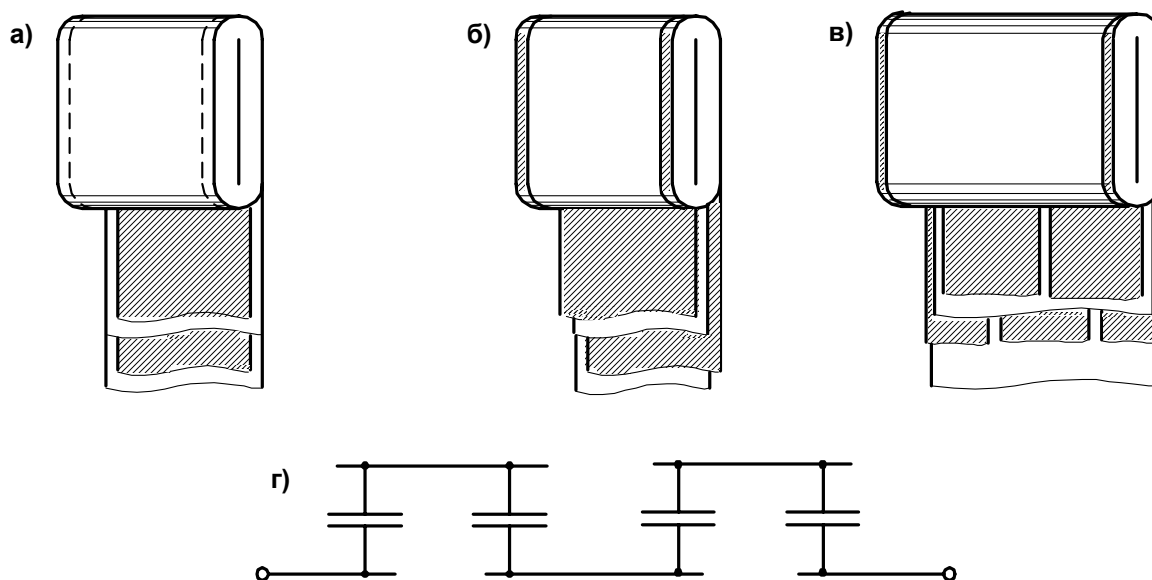


Рис. 3.7. Рулонные секции конденсаторов со скрытой фольгой (а), с выступающей фольгой (б) и с промежуточной «слепой» фольгой (в)

В качестве изоляции используется пропитанная *конденсаторная бумага и полимерные пленки*.

Самые существенные характеристики конденсаторной бумаги – ее

толщина (колеблется от 4 до 30 мкм), плотность, угол диэлектрических потерь (у пропитанной бумаги  $\operatorname{tg} \delta=0.0012..0.0026$ ) и электрическая прочность, сильно зависящая от материала пропитки.

**Из полимерных пленок** в конденсаторах промышленной и повышенной частоты применяют полипропиленовую пленку ( $\epsilon_r=2.25$ ,  $\operatorname{tg} \delta=0.0003$ ), а в импульсных конденсаторах – лавсановую пленку ( $\epsilon_r=3.2$ ,  $\operatorname{tg} \delta=0.003$  при 50 Гц и  $\operatorname{tg} \delta=0.02$  при 1 МГц). У полимерных пленок высокая электрическая прочность, достаточная термостойкость и механическая прочность, совместимость с жидкими диэлектриками, применяемыми для пропитки.

В силовых конденсаторах часто применяют **комбинированную бумажно-пленочную изоляцию**, в которой слои конденсаторной бумаги перемежаются со слоями полимерной пленки. Бумага впитывает жидкость, втягивая ее в прослойки между пленками, и обеспечивает отсутствие газовых включений. В такой изоляции благоприятное распределение напряженности электрического поля: в пленке напряженность примерно вдвое больше, чем в бумаге, поскольку  $\epsilon_r$  пленки примерно вдвое меньше, а электрическая прочность пленки выше.

**В качестве пропиток** используют нефтяное конденсаторное масло, хлорированные дифенилы и их заменители, а в импульсных конденсаторах – касторовое масло. Хлорированные дифенилы имеют более высокую диэлектрическую проницаемость по сравнению с конденсаторным маслом, высокую стойкость к разложению в электрическом поле, негорючесть, но токсичны и чувствительны к примесям.

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

**Рабочие напряженности поля**  $E_{\text{раб}}$  в изоляции бумажно-масляных конденсаторов составляют 12..14 кВ/мм, при пропитке хлордифенилами или их заменителями  $E_{\text{раб}}$  возрастают до 18..22 кВ/мм, но при этом возможен недопустимый нагрев и угол потерь должен быть малым. Бумажно-полипропиленовый диэлектрик с двумя листами пленки ( $\epsilon_r=2.25$ ) и листом бумаги ( $\epsilon_r=4$ ) между ними допускает  $E_{\text{раб}}$  от 18 кВ/мм и выше в бумажном компоненте в зависимости от пропитки и до 50..60 кВ/мм в пленке. Конденсаторы с чисто пленочным диэлектриком допускают  $E_{\text{раб}}$  до 50..60 кВ/мм, а в конденсаторах с использованием металлизированной полипропиленовой пленки – до 70 кВ/мм. При повышенных частотах допустимые рабочие напряженности поля определяются в основном тепловым режимом. При постоянном напряжении допустимая рабочая напряженность может достигать 80 кВ/мм.



### 3.4. Изоляция силовых кабелей

Силовые кабели *предназначены* для передачи и распределения электрической энергии. Кабель высокого напряжения состоит из следующих *составных частей*:

- одна или несколько токопроводящих жил;
- изоляция;
- оболочка из алюминия или свинца для герметизации;
- брони из стальных лент или проволок для защиты от механических повреждений;
- покровы из лент кабельной бумаги или пряжи, пропитанные битумом, для защиты от коррозии.

Изоляция кабеля *разделяется* на фазную, между жилами, и поясную, между жилами и оболочкой.

*Жилы кабеля* изготавливают из алюминия или меди. Кабели на напряжение до 10 кВ включительно изготавливаются с секторными жилами, а на напряжение 20 кВ и выше – с круглыми жилами, обычно с отдельными экранами. Конструкция с секторными жилами обеспечивает более полное использование объема под металлической оболочкой, а круглые жилы с экранами служат для обеспечения равномерного радиально направленного электрического поля (рис. 3.8).

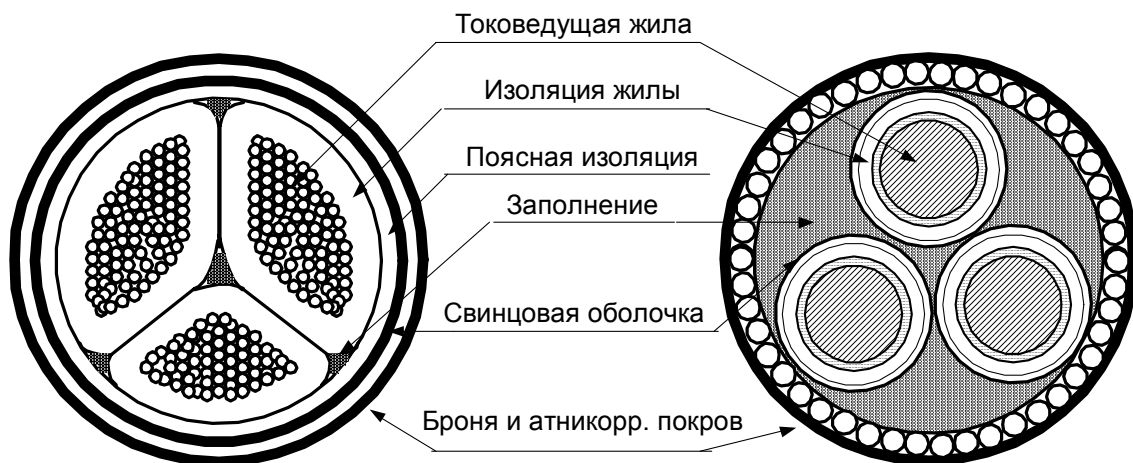


Рис. 3.8. Трехжильные кабели с вязкой пропиткой

*Изоляция выполняется* либо слоями кабельной бумаги, пропитанной вязкими маслоканифольными компаундами или кабельными маслами (нефтяными или синтетическими), либо из пластмасс. Кабельная бумага толще конденсаторной, от 80 до 170 мкм. Слои бумаги накладывают так, чтобы зазоры слоев не совпадали. В высоковольтных кабелях с пластмассовой изоляцией преимущественно используется полиэтилен низкой и высокой плотности, иногда прослойки изоляции выполняют из фторопласта. Кабели с пластмассовой изоляцией выполняются на напряжения до 400 кВ.

*Кабели с вязкой пропиткой* изготавливают на напряжения не выше 35 кВ, поскольку при тепловых подвижках в такой изоляции образуются пустоты, снижающие рабочие напряженности электрического поля. В *кабелях 110 кВ и выше* применяется бумажная изоляция с менее вязкой пропиткой и поддержанием избыточного низкого (до 0.5 МПа) или высокого (до 1.5 МПа) давления масла. Кабели высокого давления в ряде случаев выполняют в стальном трубопроводе, каждая жила поверх изоляции имеет отдельный металлический экран.

### 3.5. Изоляция электрических машин высокого напряжения

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

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

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

Витковая изоляция *выполняется* обычно из стеклослюдяной ленты или на основе эмалированных проводов со стекловолокнистой обмоткой, пропитанных эпоксидным компаундом. Главная изоляция выполняется на основе слюдяных изоляционных материалов с обеспечением отсутствия газовых прослоек. Токоведущая часть стержней выполняется прямоугольной формы, и электрическое поле в пазах неоднородно. Для снижения неоднородности поля углы стержней закругляют или применяют экраны (прокладки) из алюминия.

*Кратковременная электрическая прочность* корпусной изоляции при толщинах от 3 до 12 мм характеризуется на частоте 50 Гц средней электрической прочностью 30..35 кВ/мм. Однако *рабочие напряженности электрического поля* в связи с нестабильностью характеристик выбираются на уровне 2..4 кВ/мм. При рабочих напряженностях в высоковольт-

ных электрических машинах в течение длительного времени существуют частичные разряды заметной интенсивности, которые слабо влияют на надежность и долговечность изоляции, поскольку слюда весьма стабильна к воздействию частичных разрядов.

### ***РЕЗЮМЕ***

Изоляция силовых трансформаторов разделяется на внешнюю и внутреннюю. Внутренняя изоляция делится на главную и продольную. Главная изоляция силовых трансформаторов чаще всего выполняется маслобарьерного типа, а продольная изоляция – слоями электроизоляционной бумаги, накладываемой поверх провода.

Проходные изоляторы высокого напряжения имеют неблагоприятное расположение электродов, слабую механическую прочность на изгиб и характеризуются нагревом изоляционного тела изолятора. Наиболее распространенной конструкцией проходного изолятора является конденсаторный ввод.

От силовых конденсаторов требуется обеспечение необходимой емкости, рабочего напряжения и тепловой устойчивости, что определяется изоляцией конденсатора. В качестве изоляции используется пропитанная конденсаторная бумага и полимерные пленки. Electroдами в силовых конденсаторах является алюминиевая фольга толщиной 7..12 мкм.

Изоляция силовых кабелей выполняется либо слоями кабельной бумаги, пропитанной вязкими маслоканифольными компаундами или кабельными маслами (нефтяными или синтетическими), либо из пластмасс. В кабелях 110 кВ и выше применяется бумажная изоляция с менее вязкой пропиткой и поддержанием избыточного низкого или высокого давления масла.

В электрических машинах высокого напряжения изоляцию обмоток статоров разделяют на главную изоляцию, на междуфазную изоляцию и на продольную изоляцию.

### **Контрольные вопросы**

1. Опишите конструктивные особенности построения изоляции силовых трансформаторов.
2. Как выполняется изоляция высоковольтных вводов?
3. Каким образом устроена изоляция силовых конденсаторов?
4. Каково устройство силовых кабелей, как выполнена их изоляция?

## Лекция 4. ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

### 4.1. Дефекты изоляции и механизмы их возникновения

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

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

- электрические нагрузки, связанные с возможной ионизацией при большой напряженности электрического поля – электрическое старение изоляции;
- тепловые нагрузки, приводящие к постепенному разложению или появлению трещин в изоляции – тепловое старение изоляции;
- механические нагрузки, приводящие к возникновению и развитию трещин в твердой изоляции – механическое старение;
- проникновение влаги из окружающей среды – увлажнение изоляции.

Возникающие в изоляции дефекты подразделяются на *сосредоточенные* (трещины, газовые включения, эрозия, увлажнение небольшого объема изоляции) и *распределенные*, охватывающие значительный объем или поверхность изоляции.

*Электрическое старение* твердой изоляции происходит из-за возникновения разрядных процессов в толще изоляции. Электрическое старение может иметь место при средней напряженности электрического поля на промежутке, много меньшей (в 5..20 раз) кратковременной электрической прочности изоляции. С увеличением напряжения темпы электрического старения возрастают. Основной причиной электрического старения внутренней изоляции являются *частичные разряды*, то есть такие разрядные процессы в изоляции, которые распространяются лишь на часть изоляционного промежутка. Они возникают в ослабленных местах изоляции: в газовых включениях, в местах резкого усиления напряженности поля. Наибольшую опасность представляют частичные разряды в газовых включениях, так как они возникают при меньших напряжениях, чем разряды в жидких или твердых компонентах твердой изоляции. Последнее обстоятельство связано с меньшей диэлектрической проницаемостью газового промежутка и соответственно большей напряженностью электрического поля в нем, а также с малой электрической прочностью газа по сравнению с твердой или жидкой изоляцией.

Закономерности развития частичных разрядов можно проиллюстри-

ровать схемой замещения, изображенной на рис. 4.1, где изображен газовый пузырь в твердой изоляции и схема замещения изоляции.

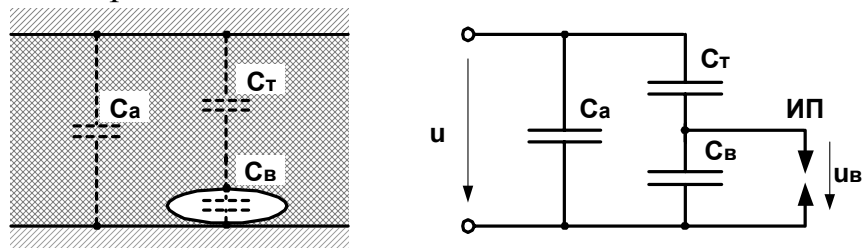


Рис. 4.1. Схема развития частичных разрядов в газовом включении

На рис. 4.1  $C_B$  – емкость газового включения,  $C_T$  – емкость части изоляции, включенной последовательно с газовым включением,  $C_A$  – емкость оставшегося массива изоляции. При подаче на изоляцию переменного напряжения на воздушном включении также будет изменяться во времени напряжение, определяемое емкостным делителем:

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

и при достижении этим напряжением пробивного напряжения газового включения  $U_{в-пр}$  происходит пробой газового включения с резким снижением напряжения на нем до уровня напряжения гашения  $U_{в-г}$ , которое меньше пробивного напряжения. После этого, если напряжение на всей изоляции продолжает возрастать, то снова начинается рост напряжения и на газовом включении и может произойти новый пробой, то есть в **газовом включении происходят многократные пробои** промежутка. Графическое изображение зависимости напряжений от времени показаны на рис. 4.2 при условии подачи напряжения в нулевой момент времени.

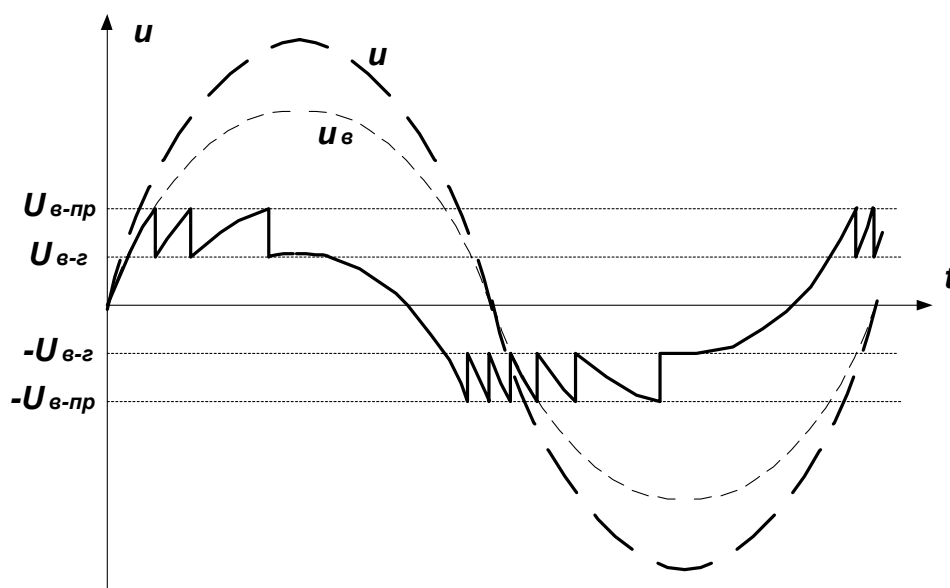


Рис. 4.2. Зависимость напряжений от времени при частичных разрядах

Под действием частичных разрядов происходит постепенное разрушение микрообъемов изоляции, размеры газового включения растут в направлении электрического поля, и этот процесс завершается пробоем изоляции.

При постоянном напряжении интенсивность частичных разрядов существенно слабее, поскольку зарядение емкости газового включения  $C_v$  происходит за счет токов утечки через изоляцию, которые обычно много меньше емкостных токов.

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

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

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

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

**Увлажнение изоляции** может рассматриваться как одна из форм старения изоляции. Влага проникает в изоляцию главным образом из окружающего воздуха. При этом происходит уменьшение сопротивления изоляции, рост диэлектрических потерь, связанный с дополнительным нагревом изоляции и ускоряющий тепловое старение изоляции. Неравномерное увлажнение, кроме того, приводит к искажению электрического поля и снижает пробивное напряжение изоляции.

Увлажнение – процесс в принципе обратимый, влага может быть удалена из изоляции сушкой. Однако сушка крупногабаритных конструкций требует вывода оборудования из строя на длительное время, а в ряде

случаев извлечение влаги из изоляции затруднено или невозможно, например, практически не поддается сушке бумажно-масляная изоляция кабелей, вводов и другого оборудования.

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

## 4.2. Основные виды профилактических испытаний изоляции

Перечисленные выше механизмы старения изоляции не исчерпывают все воздействующие на изоляцию факторы. Дополнительно на изоляцию воздействуют загрязнения, внешний перегрев, перенапряжения, короткие замыкания. Влияние этих факторов на характеристики изоляции представлено в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Изменение характеристик изоляции в зависимости от воздействующих факторов

Фактор	Изменение
Увлажнение	Уменьшение сопротивления Увеличение емкости Увеличение tg $\delta$ Повышение температуры Повышение давления во вводах Снижение пробивного напряжения трансформ. масла Изменение химического состава Частичные разряды
Загрязнение	Уменьшение сопротивления Увеличение tg $\delta$ Повышение температуры Снижение пробивного напряжения трансформ. масла Изменение химического состава Частичные разряды
Перенапряжения	Пробой изоляции Частичные разряды
Перегрев	Уменьшение сопротивления Увеличение tg $\delta$ Повышение давления во вводах Изменение химического состава Частичные разряды
Короткие замыкания	Термические и динамические внешние воздействия на изоляцию

Классификация методов диагностики и испытаний изоляции производится по признаку возможного разрушения изоляции в процессе контроля и по признаку применения электрических методов.

По признаку возможного разрушения изоляции методы контроля

изоляция подразделяются на три группы:

- **неразрушающие методы контроля, производимые при напряжениях**, меньших рабочих, и основанные на явлениях, возникающих в слабых электрических полях (электропроводность и поляризационные явления) и связанных с пробивным напряжением изоляции;
- **неразрушающие методы контроля, производимые при рабочих напряжениях**, – в основном это контроль частичных разрядов, а также тепловой и ультразвуковой контроль;
- **разрушающие методы контроля**, связанные с использованием напряжения, повышенного по сравнению с рабочим напряжением и вызывающего ускоренное разрушение изоляции в дефектном месте; приложение повышенного напряжения не исключает появления дефекта, который может привести к пробое изоляции во время эксплуатации.

По признаку применения электрических методов методы контроля подразделяют на две группы:

- **электрические методы** контроля изоляции, которые рассмотрены далее;
- **неэлектрические методы** контроля: хроматографический анализ газов в трансформаторном масле, ультразвуковые методы контроля, радиоволновой метод, тепловизионный метод, оптикоэлектронный метод, рентгенографический метод.

## **РЕЗЮМЕ**

В процессе эксплуатации изоляции на нее воздействуют частичные разряды, тепловые и механические нагрузки, из окружающего воздуха проникает влага. Все это приводит к появлению сосредоточенных и распределенных дефектов изоляции.

Методы контроля состояния изоляции подразделяются на неразрушающие методы, производимые при пониженных напряжениях и при рабочих напряжениях, и на разрушающие методы контроля, предполагающие использование напряжений, повышенных по сравнению с рабочими.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается сущность электрического старения изоляции?
2. Каков механизм теплового старения изоляции?
3. Как происходит механическое старение изоляции?
4. Приведите классификацию методов контроля изоляции.



## Лекция 5. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

### 5.1. Контроль сопротивления изоляции

*Основное требование к изоляции* сводится к отсутствию ее нагрева при рабочем напряжении, и вместе с тем от изоляции требуется не проводить ток при постоянном напряжении. Измерение сопротивления изоляции является одним из простейших, но весьма эффективных методов контроля состояния изоляции, позволяющих фиксировать один из самых распространенных дефектов изоляции - ее увлажнение, приводящее к существенному нагреву при переменном напряжении из-за увеличения сквозной электропроводности диэлектрика и увеличения поляризационных потерь. Измерение сопротивления изоляции позволяет контролировать как *сплошное увлажнение изоляции, так и увлажнение только одного из слоев* в слоистой изоляции.

*Сопротивлением изоляции* называют отношение напряжения, приложенного к изоляции, к току через сечение изоляции, при приложении постоянного напряжения и через 1 мин. после подачи напряжения, то есть это – сопротивление при постоянном напряжении через 1 мин. после его подачи. *Сплошное увлажнение изоляции* приводит к снижению ее сопротивления ввиду высокой проводимости влаги, что позволяет по величине сопротивления сразу судить о возможном ее увлажнении. Из-за наличия абсорбционных явлений ток через изоляцию при приложении постоянного напряжения меняется по величине в течение некоторого времени порядка десятков секунд, поэтому сопротивлением изоляции и считают ее сопротивление через 60 с после приложения напряжения. Суть абсорбционных явлений - и одновременно возможность контроля слоистого увлажнения изоляции - поясняет рис. 5.1, на котором изображена двухслойная изоляция и две равноправные эквивалентные схемы замещения двухслойной изоляции.

Схема рис. 5.1б является естественной схемой замещения двухслойной изоляции, учитывающей сквозные токи через слои изоляции и емкости слоев. Схема рис. 5.1в совершенно аналогична схеме рис. 5.1б, если выполняются соотношения следующего типа:

$$R = R_1 + R_2, C_r = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2};$$
$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}, \Delta C = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)}.$$

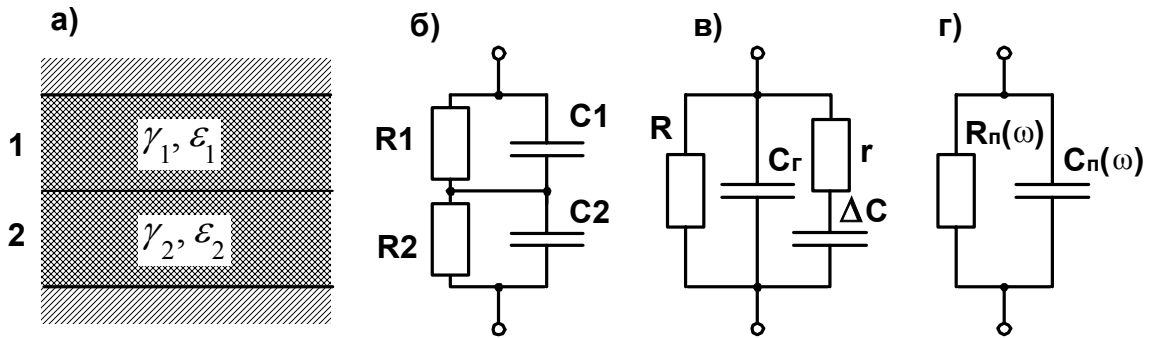


Рис. 5.1. Двухслойная изоляция и различные схемы ее замещения

При подаче постоянного напряжения сначала происходит резкий скачок напряжения от нуля до установившегося значения, при котором ток протекает только по емкостным элементам (рис. 5.1б). Распределение напряжения определяется емкостями этих элементов. По прошествии некоторого времени емкостные элементы перестают играть какую-либо роль и распределение напряжения по слоям определяется их омическими сопротивлениями. Если величины сопротивлений велики, то перезарядка емкостных элементов длится достаточно долго, показания мегаомметра в течение некоторого времени (десятки секунд) будут изменяться; хорошая изоляция без увлажнения означает достаточно длительный процесс перехода в установившийся режим. При увлажнении одного из слоев перезарядка через один из низкоомных элементов R1 или R2 пройдет достаточно быстро, за время менее 15 с. Если даже второй слой имеет большое сопротивление (а при переменном напряжении низкоомный слой будет нагреваться емкостными токами высокоомного слоя), то по соотношению сопротивлений, измеренных в разные моменты времени (конкретно - через 60 с,  $R_{60}$ , и через 15 с,  $R_{15}$ ), можно судить об увлажнении одного из слоев.

Если пренебречь начальным скачком тока, заряжающего геометрическую емкость  $C_r$ , то после приложения постоянного напряжения ток через изоляцию определяется суммой сквозного тока через элемент  $R$  (рис. 5.1в) и тока заряда элемента  $\Delta C$ :

$$i = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} e^{-t/T},$$

откуда  $R(t) = \frac{U}{i} = \frac{R}{1 + \frac{R}{r} e^{-t/T}}$  - сопротивление двухслойной изоляции меняется

во времени, и скорость изменения выше, если хотя бы один из слоев имеет невысокое сопротивление (рис. 5.2);  $T = r \Delta C$ .

Таким образом, *контролируя величину  $R_{60}$ , можно судить о наличии сплошного увлажнения изоляции, а по отношению  $K_{abc} = R_{60} / R_{15}$ , называемому коэффициентом абсорбции, можно судить о наличии увлажнения одного из слоев изоляции.* Более конкретно, если  $K_{abc} < 1.3$ , то,

как это следует из опытных данных, изоляция недопустимо увлажнена.

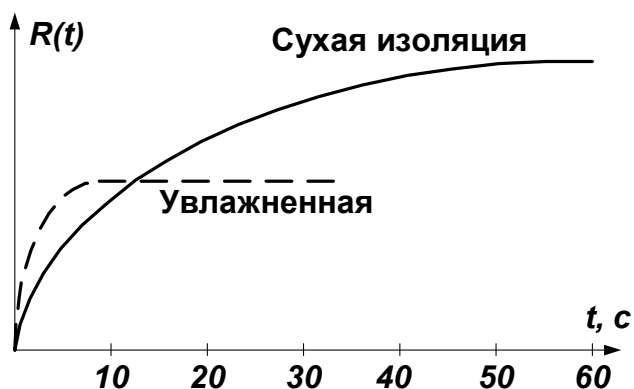


Рис. 5.2. Зависимость сопротивления от времени при сухой и увлажненной изоляции

Коэффициент абсорбции является показателем увлажнения изоляции при температурах ниже  $35..40^{\circ}\text{C}$ . При более высокой температуре возрастает ток сквозной проводимости и коэффициент абсорбции и для сухой, и для влажной изоляции приближаются к единице.

**При измерении сопротивления изоляции** принимают во внимание прежде всего абсолютную величину сопротивления  $R_{60}$ , которая должна быть не меньше нормированного значения, а затем и коэффициент абсорбции. Если обе величины не выходят за пределы нормы, то говорят о том, что увлажнения изоляции не обнаружено; если хотя бы одна из величин неудовлетворительна, то делают вывод о недопустимом увлажнении изоляции.

Требуемые значения сопротивления изоляции для различных установок представлены в правилах эксплуатации электроустановок. Для силовых трансформаторов значения сопротивления изоляции, устанавливаемые нормами, зависят от температуры обмоток; так, у трансформаторов с номинальным напряжением обмотки высшего напряжения 35 кВ при  $20^{\circ}\text{C}$  сопротивление главной изоляции должно быть не менее 300 МОм, у трансформаторов 110 кВ – не менее 600 МОм. Поскольку изоляция трансформаторов включает в свой состав ряд изоляционных промежутков, для контроля характеристик изоляции, включая и измерения сопротивления, используют нормативные схемы измерения. Перечень схем для двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов приведен в табл. 5.1.

Измерения сопротивления изоляции в эксплуатации производят мегаомметрами на напряжение 0.5 кВ, 1 кВ или 2.5 кВ. Наиболее распространенными являются мегаомметры со встроенными генераторами, обеспечивающими автономную работу; к такому типу относится мегаомметр М1102. Мегаомметры типа Ф4101, позволяющие измерять сопротивления до 50000 МОм, имеют комбинированное питание (от сети и от сухих эле-

ментов) и построены по последовательной схеме, в которой источник напряжения, измерительный элемент и испытываемая изоляция включаются последовательно.

Таблица 5.1

Схемы измерения характеристик изоляции трансформаторов

Последовательность измерений	Двухобмоточные		Трехобмоточные	
	Измеряемые обмотки	Заземляемые части	Измеряемые обмотки	Заземляемые части
1	НН	Бак, ВН	НН	Бак, СН, ВН
2	ВН	Бак, НН	СН	Бак, НН, ВН
3	(ВН+НН)*	Бак	ВН	Бак, НН, СН
4	–	–	(ВН+СН)*	Бак, НН
5	–	–	(ВН+СН+НН)*	Бак

\*Измерения обязательны только для трансформаторов мощностью 16000 кВА и более.

## 5.2. Контроль емкости изоляции

Контроль величины емкости изоляции позволяет выявлять слоистое увлажнение изоляции. Емкость идеального конденсатора не зависит от частоты; чем больше диэлектрические потери в реальном конденсаторе или в изоляции, тем сильнее зависит от частоты емкость идеального емкостного элемента в схеме замещения реального конденсатора.

Можно попытаться использовать простую параллельную схему замещения двухслойной изоляции по рис. 5.1а с параллельно соединенными резистивным элементом  $R_{II}$  и емкостным элементом  $C_{II}$  (рис. 5.1г). При этом, однако, значения параметров схемы замещения оказываются частотно-зависимыми; в частности,  $C_{II} = C_{Г} + \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 T^2}$ ,  $T = r \Delta C$ . Вид зависимости  $C_{II}(\omega)$  показан на рис. 5.3. С ростом степени увлажнения возрастает размах изменения емкости  $C_{II}(\omega)$  с изменением частоты. Использование этой зависимости может служить для обнаружения слоистого увлажнения изоляции.

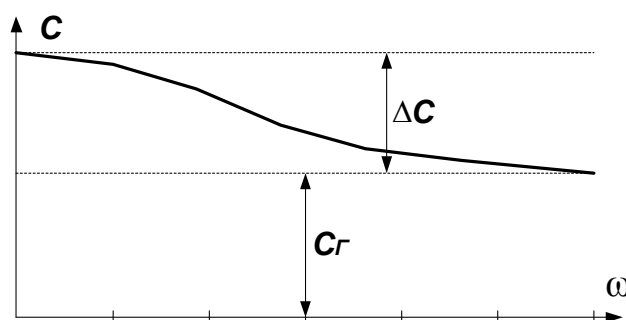


Рис. 5.3. Зависимость емкости от частоты для двухслойной изоляции

Для оценки состояния изоляции измерения производят на частотах 2

Гц и 50 Гц при неизменной температуре изоляции и затем определяют отношение  $\frac{C_2}{C_{50}}$ , которое и служит показателем качества изоляции. На основании опыта установлено, что изоляция имеет недопустимое увлажнение, если  $\frac{C_2}{C_{50}} > 1.3$ .

Для измерения емкостей используются два основных принципа, проиллюстрированные рис. 5.4.

Переключатель в схеме рис. 5.4а периодически подключает испытуемую изоляцию к источнику постоянного напряжения, заряжая емкость изоляции, а затем – к цепи с гальванометром РА, через который емкость изоляции разряжается. Средний ток через гальванометр определяется частотой переключения,  $I = U C(\omega) f$ , так что при измерении на частотах 2 Гц и 50 Гц отношение емкостей определяется отношением токов:  $\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50 I_2}{2 I_{50}}$ .

По такому принципу работают приборы контроля влажности серии ПКВ.

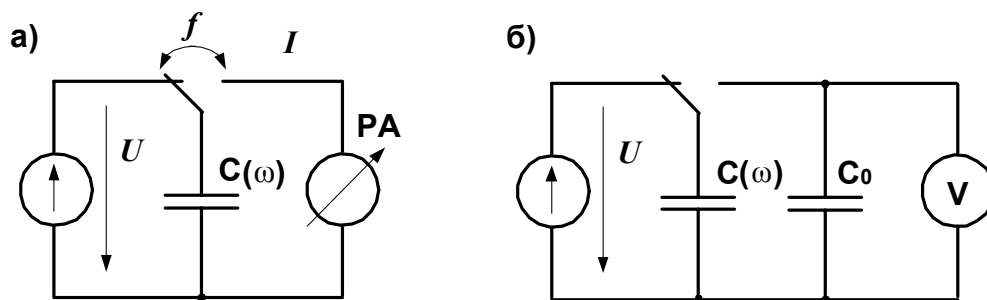


Рис. 5.4. Принципиальное устройство приборов емкостного контроля увлажнения

По схеме рис. 5.4б испытываемая изоляция заряжается от источника постоянного напряжения, а затем на короткое время, примерно на четверть периода частоты 50 Гц, то есть на 5 мс, подключается к образцовому конденсатору  $C_0$ . На образцовый конденсатор переносится заряд, пропорциональный емкости  $C_{50}$  (примерно соответствующей геометрической емкости  $C_T$  рис. 5.1в). Затем изоляция снова заряжается, кратковременно замыкается для разряда геометрической емкости и на время около четверти периода частоты 2 Гц (примерно 130 мс) подключается к образцовому конденсатору для снятия части заряда с абсорбционной емкости  $\Delta C$ , что позволяет определить разность  $C_2 - C_{50}$ . По этой разнице и по значению  $C_{50}$  определяется отношение емкостей:  $\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1$ . Напряжение на эталонном конденсаторе измеряется с помощью электронного вольтметра, имеющего большое входное сопротивление. По этому принципу работают приборы серии ПЕКИ и У-268.

### 5.3. Хроматографический анализ масла

При возникновении дефектов в маслonaполненной изоляции (масляные трансформаторы, маслonaполненные вводы) происходит изменение физических характеристик и химического состава масла. Распределенные дефекты в такой изоляции могут быть выявлены при проведении общего химического анализа нефтяного масла или при измерении его электрической прочности и тангенса угла диэлектрических потерь.

В последнее время все более широкое распространение находит методика выявления повреждений в силовых трансформаторах по результатам *анализа растворенных в масле газов*. Идея метода основана на предположении о том, что повреждение в трансформаторе сопровождается выделением различных газов, отсутствующих в масле при нормальной работе. Эти газы первоначально растворяются в масле и в газовое реле практически не попадают. Выделив эти газы из масла и проведя их анализ, можно обнаружить повреждения на разной стадии их возникновения.

Отбор масла производится так, чтобы исключить его соприкосновение с окружающей воздушной средой для предотвращения потерь растворенных в масле газов. Масло помещается в замкнутый объем и газ над поверхностью масла подвергается анализу на хроматографе. Оценка состояния маслonaполненного оборудования осуществляется обычно на базе следующих критериев:

- критерий предельных концентраций (водород, метан, этилен, этан, ацетилен, окись и двуокись углерода и др. газы); разложение масла и разложение целлюлозы приводят к превышению концентраций разных газов, частичные разряды приводят к появлению водорода и т.п.;
- критерий скорости нарастания концентраций газов – при ежемесячном контроле;
- критерий отношений концентраций газов – соотношение концентраций позволяет выявлять перегревы и даже температуру перегрева;
- критерий равновесия – сопоставление результатов анализа масла из газового реле и из пробы.

Хроматографический анализ газов производится на компьютерных комплексах, позволяющих автоматизировать анализ критериев и распознавать появляющиеся дефекты в оборудовании до отказа оборудования.

### **РЕЗЮМЕ**

Измерение сопротивления изоляции позволяет контролировать как сплошное увлажнение изоляции, так и увлажнение только одного из слоев в слоистой изоляции. При измерении сопротивления изоляции принимают во внимание прежде всего абсолютную величину сопротивления  $R_{60}$ , которая должна быть не меньше нормированного значения, а затем и коэффи-

циент абсорбции. Если обе величины не выходят за пределы нормы, то говорят о том, что увлажнения изоляции не обнаружено; если хотя бы одна из величин неудовлетворительна, то делают вывод о недопустимом увлажнении изоляции.

Контроль величины емкости изоляции позволяет выявлять слоистое увлажнение изоляции.

Для выявления повреждений в силовых трансформаторах используется хроматографический анализ растворенных в масле газов.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое изоляция?
2. Что называют сопротивлением изоляции? Чем отличается это понятие от понятия сопротивления резистора?
3. К каким последствиям приводит увлажнение изоляции?
4. Какова методика контроля изоляции измерением сопротивления?
5. Каким образом производится контроль изоляции измерением ее емкости?

## **Лекция 6. КОНТРОЛЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

### **6.1. Контроль диэлектрических потерь в изоляции**

Измерение  $\operatorname{tg} \delta$  считается одним из основных методов контроля изоляции электрооборудования высокого напряжения, поскольку распределенные дефекты (увлажнение, ионизация газовых включений) в первую очередь вызывают увеличение диэлектрических потерь. При измерениях контролируют абсолютную величину  $\operatorname{tg} \delta$ , изменения  $\operatorname{tg} \delta$  по сравнению с предыдущими измерениями, а в некоторых случаях, например, для изоляции электрических машин, снимают зависимость  $\operatorname{tg} \delta(U)$ , иногда и при повышенных напряжениях (до  $2U_{\text{ном}}$ ). Измеренное значение  $\operatorname{tg} \delta$  в сопоставлении с нормативом дает представление о текущем состоянии изоляции, характер изменения  $\operatorname{tg} \delta$  при периодических измерениях позволяет судить об ухудшении свойств изоляции в процессе эксплуатации, а рост  $\operatorname{tg} \delta$  при повышении напряжения свидетельствует о частичных разрядах в изоляции. Измерения  $\operatorname{tg} \delta$  на высоком напряжении проводят измерительными мостами переменного тока, построенными по схеме Шеринга.

Принципиальное устройство четырехплечего высоковольтного уравновешенного измерительного моста переменного тока, выполненного по схеме Шеринга, показано на рис. 6.1.

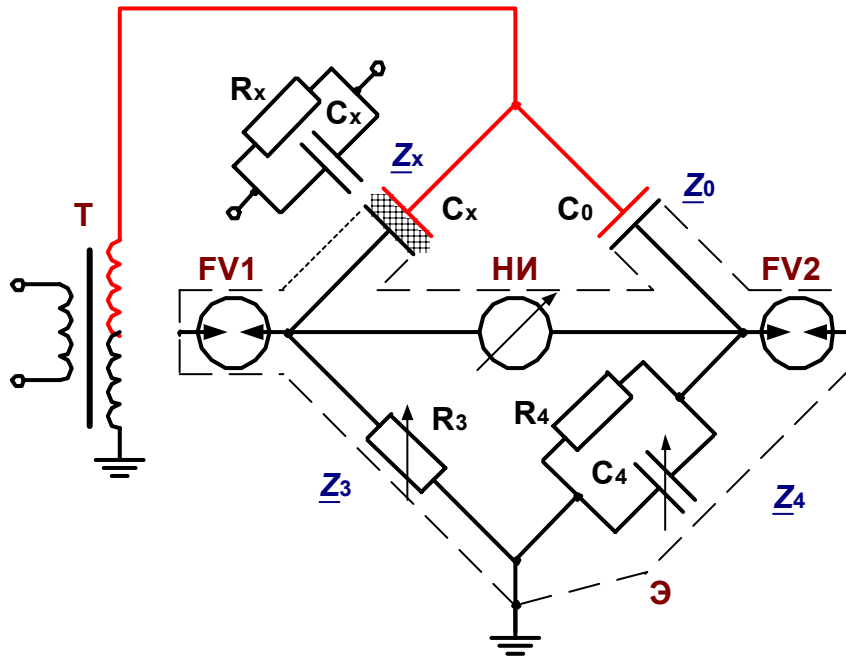


Рис. 6.1. Принципиальное устройство моста Шеринга

На рис. 6.1  $C_x$  – испытуемая изоляция, замещаемая параллельной схемой  $C_x R_x$ ,  $C_0$  – образцовый воздушный конденсатор, обладающий малыми диэлектрическими потерями,  $R_3$  – магазин емкостей (набор образцовых резисторов),  $R_4$  – образцовый резистор,  $C_4$  – магазин емкостей (набор образцовых конденсаторов). Буквой Т обозначен высоковольтный трансформатор, питающий схему моста, НИ – нуль-индикатор, служащий для уравнивания моста, FV1, FV2 – низковольтные разрядники, защищающие низковольтную часть моста при пробое испытуемой изоляции, Э – экран, роль которого объяснена далее при рассмотрении перевернутой схемы моста.

Отличительными особенностями моста по схеме Шеринга является высокое напряжение питания моста и достаточно хорошая сходимость моста при его уравнивании. Последнее обстоятельство для моста переменного тока, работающего на синусоидальном напряжении и требующего для сходимости выравнивания модулей и фаз потенциалов на измерительной диагонали моста, имеет важнейшее значение.

Условием равновесия четырехплечего моста, как известно, является равенство произведений сопротивлений противоположных плеч, то есть

$$\underline{Z}_x \underline{Z}_4 = \underline{Z}_0 \underline{Z}_3,$$

где  $\underline{Z}_x = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x}$ ,  $\underline{Z}_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}$ ,  $\underline{Z}_0 = \frac{1}{j\omega C_0}$ ,  $\underline{Z}_3 = R_3$ .

Комплексное уравнение произведения сопротивлений распадается на два вещественных уравнения, из которых получают соотношения для  $C_x$  и  $\text{tg } \delta$ :



$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4, \quad C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}.$$

Если  $\operatorname{tg} \delta < 0.1$ , то  $C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3}$ . При конкретном значении  $R_4$  шкалу мазина емкостей  $C_4$  можно проградуировать в единицах  $\operatorname{tg} \delta$ .

В нормальной схеме моста по рис. 6.1 оба электрода испытуемой изоляции изолированы от земли. Часто при проведении испытаний испытуемый объект имеет заземленный электрод, который сложно отсоединить от заземленных цепей, и в этих случаях для измерений используется перевернутая схема моста Шеринга, изображенная на рис. 6.2.

В случае перевернутой схемы нижние элементы схемы находятся под высоким потенциалом. Поскольку все эти элементы расположены внутри заземленного корпуса, то на паразитных емкостях элементов по отношению к корпусу имеется высокое напряжение, и возникающие из-за этого паразитные токи приводят к невозможности правильного уравнивания моста чувствительным нуль-индикатором. Эта проблема решается установкой внутри заземленного корпуса дополнительного экрана Э, соединенного с нижней точкой моста и имеющего всегда тот же потенциал, что и измерительные элементы моста. При этом на паразитных емкостях внутри экрана напряжения и в нормальной, и в перевернутой схеме всегда очень небольшие.

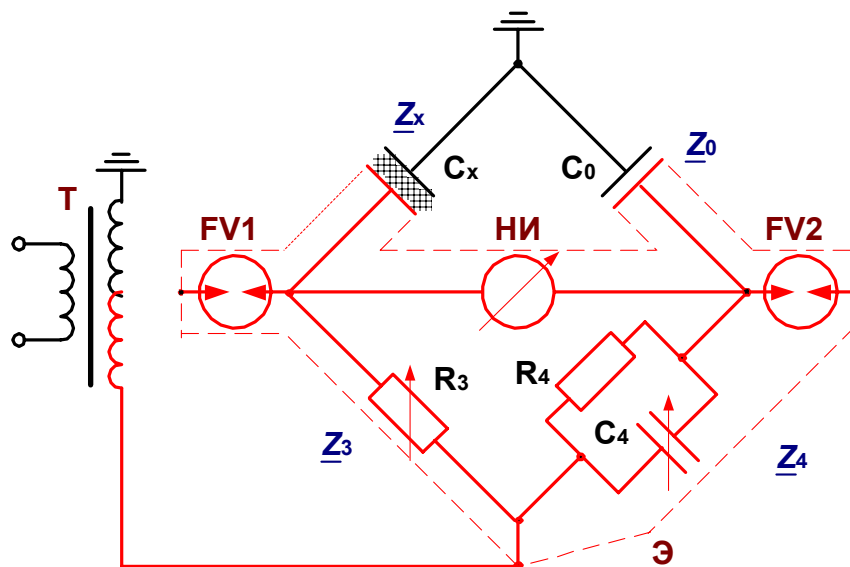


Рис. 6.2. Перевернутая схема моста Шеринга

Наиболее распространенным прибором такого типа является мост P5026, позволяющий измерять емкости изоляции от 10 пФ до 500 мкФ и тангенсы угла потерь от 0.0001 до 1.0 с погрешностями порядка единиц процентов при напряжении 10 кВ. Нередко встречаются старые модификации этого моста МД-16 и Р-595.

Для измерения угла потерь тарельчатых изоляторов существует прибор ИТП-1, позволяющий измерять  $\operatorname{tg} \delta$  в пределах 0.002..0.4 при напряжении 1.5 кВ на частоте 12.5 Гц, что обеспечивает высокую помехозащищенность измерений.

## 6.2. Контроль частичных разрядов

Обнаружение частичных разрядов основано на регистрации их внешних проявлений. Наибольшее распространение получил электрический метод, сущность которого состоит в регистрации скачка напряжения на изоляции  $\Delta u$ , происходящего при частичном разряде. Скачок напряжения происходит за время порядка  $10^{-7}..10^{-8}$  с, и он пропорционален энергии частичного разряда.

На рис. 6.3 показана схема установки для измерения параметров частичных разрядов. Установка содержит высоковольтный трансформатор Т, испытуемый объект  $C_x$ , конденсатор связи  $C_0$ , измерительный шунт Z (резистор или катушка индуктивности), заградительный фильтр низких частот, усилитель-дискриминатор, осциллограф и счетчик импульсов. Такая схема регистрирует скачкообразное снижение напряжения на испытуемой изоляции при каждом частичном разряде (при очень коротком импульсе частичного разряда напряжение падает на индуктивности рассеяния трансформатора) и частоту следования разрядов.  $C_{вх}$  – емкость входных цепей измерительной части установки. Если  $C_{вх} \ll C_0$ , а  $C_0 \ll C_x$ , то скачок напряжения на входе измерительной части практически равен скачку напряжения на испытуемой изоляции.

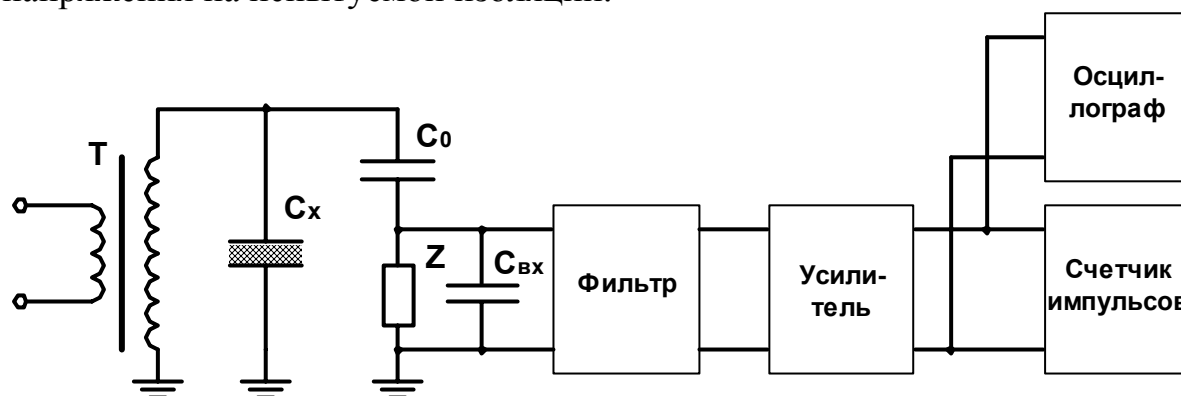


Рис. 6.3. Принцип работы установки контроля частичных разрядов

*За меру интенсивности единичного частичного разряда* принимают так называемый кажущийся заряд  $q = \Delta U C_x$ , а интенсивность многократных частичных разрядов определяется *средним током частичных разрядов*  $I_{чр} = n_f q$ , где  $n_f$  - число импульсов за 1 с. Поскольку импульсы разные по амплитуде, используется усилитель-дискриминатор, разделяю-

щий импульсы по амплитуде, и далее подсчитываются импульсы каждого уровня, так что  $I_{\text{цр}} = \sum_{i=1}^k (n_f q)_i$ .

Опытным путем установлено, что при  $q=10^{-16}..10^{-14}$  Кл происходит относительно медленное старение изоляции, а при  $q=10^{-9}..10^{-6}$  Кл изоляция разрушается за очень короткое время и такие частичные разряды недопустимы даже при испытаниях повышенным напряжением.

### **РЕЗЮМЕ**

Измерение  $\text{tg } \delta$  – это один из основных методов контроля изоляции электрооборудования высокого напряжения. При измерениях контролируют абсолютную величину  $\text{tg } \delta$ , изменения  $\text{tg } \delta$  по сравнению с предыдущими измерениями, а в некоторых случаях снимают зависимость  $\text{tg } \delta$  от напряжения. Для измерения используют высоковольтный измерительный мост по схеме Шеринга.

Контроль частичных разрядов позволяет судить о темпах электрического старения изоляции. В электрическом методе контроля ЧР регистрируют скачок напряжения на изоляции и величину кажущегося заряда.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие свойства изоляции характеризует угол диэлектрических потерь?
2. Как проводят контроль изоляции измерением угла диэлектрических потерь?
3. Что означает название «четырёхплечий уравновешенный мост переменного тока по схеме Шеринга»?
4. Объясните принцип работы моста Шеринга и возможности измерения угла диэлектрических потерь. Запишите уравнения равновесия моста.
5. Зачем и каким образом контролируют частичные разряды в изоляции?

## **Лекция 7. КОНТРОЛЬ ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ. ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ОБОРУДОВАНИЯ**

### **7.1. Испытания изоляции повышенным напряжением**

Испытания изоляции повышенным напряжением позволяют выявить

*локальные дефекты, не обнаруживаемые иными методами*; кроме того, такой метод испытаний является прямым методом контроля способности изоляции выдерживать воздействия перенапряжений и дает определенную уверенность в качестве изоляции. К изоляции прикладывается испытательное напряжение, превышающее рабочее напряжение, и нормальная изоляция выдерживает испытания, а дефектная пробивается.

При профилактических или послеремонтных испытаниях проверяется способность изоляции проработать без отказа до следующих очередных испытаний. Контроль изоляции повышенным напряжением дает только косвенную оценку длительной электрической прочности изоляции, и основная его задача – проверка отсутствия грубых сосредоточенных дефектов.

Испытательные напряжения *для нового оборудования* на заводах-изготовителях определяется ГОСТ 1516.2-97, а при *профилактических испытаниях* величины испытательных напряжений принимаются на 10-15% ниже заводских норм. Этим снижением учитывается старение изоляции и ослабляется опасность накопления дефектов, возникающих при испытаниях.

Контроль изоляции повышенным напряжением в условиях эксплуатации проводится только для некоторых видов оборудования (вращающиеся машины, силовые кабели) с номинальным напряжением *не выше 35 кВ*, поскольку при более высоких напряжениях испытательные установки слишком громоздки.

При испытаниях повышенным напряжением используются три основных вида испытательных напряжений: повышенное напряжение промышленной частоты, выпрямленное постоянное напряжение и импульсное испытательное напряжение (стандартные грозовые импульсы).

Основным видом испытательного напряжения является *напряжение промышленной частоты*. *Время приложения* такого напряжения – 1 мин, и *изоляция считается выдержавшей испытания*, если за это время не наблюдалось пробоя или частичных повреждений изоляции. В некоторых случаях проводят испытания напряжением повышенной частоты (обычно 100 или 250 Гц).

При большой емкости испытываемой изоляции (при испытании кабелей, конденсаторов) требуется применение испытательной аппаратуры большой мощности, поэтому такие объекты чаще всего испытываются *повышенным постоянным напряжением*. Как правило, при постоянном напряжении диэлектрические потери в изоляции, приводящие к ее нагреву, на несколько порядков ниже, чем при переменном напряжении такого же эффективного значения; кроме того, и интенсивность частичных разрядов намного ниже. При таких испытаниях нагрузка на изоляцию существенно меньше, чем при испытаниях переменным напряжением, поэтому для пробоя дефектной изоляции требуется более высокое постоянное напряжение,

чем испытательное переменное напряжение.

При испытаниях постоянным напряжением дополнительно контролируется ток утечки через изоляцию. Время приложения постоянного испытательного напряжения составляет от 5 до 15 мин. Изоляция считается выдержавшей испытания, если она не пробилась, а значение тока утечки к концу испытаний не изменилось или снизилось.

Недостаток постоянного испытательного напряжения состоит в том, что это напряжение распределяется по толще изоляции в соответствии с сопротивлениями слоев, а не в соответствии с емкостями слоев, как при рабочем напряжении или при перенапряжении. По этой причине отношения испытательных напряжений к рабочим напряжениям отдельных слоев изоляции получаются существенно разными.

Третьим видом испытательного напряжения являются *стандартные грозовые импульсы* напряжения с фронтом 1.2 мкс и длительностью до полуспада 50 мкс. Испытания импульсным напряжением производят потому, что изоляция в процессе эксплуатации подвергается воздействию грозовых перенапряжений со схожими характеристиками. Воздействие грозовых импульсов на изоляцию отличается от воздействия напряжения частотой 50 Гц из-за гораздо большей скорости изменения напряжения, приводящей к другому распределению напряжения по сложной изоляции типа изоляции трансформаторов; кроме того, сам процесс пробоя при малых временах отличается от процесса пробоя на частоте 50 Гц, что описывается вольт-секундными характеристиками. По этим причинам испытаний напряжением промышленной частоты в ряде случаев оказывается недостаточно.

Воздействие грозовых перенапряжений на изоляцию часто сопровождается срабатыванием защитных разрядников, срезающих волну перенапряжения через несколько микросекунд после ее начала, и поэтому при испытаниях используют и импульсы, срезанные через 2-3 мкс после начала импульса (*срезанные стандартные грозовые импульсы*).

*Амплитуда импульса* выбирается исходя из возможностей оборудования, защищающего изоляцию от перенапряжений, с некоторыми запасами, и исходя из возможности накопления скрытых дефектов при многократном воздействии импульсных напряжений. Конкретные величины испытательных импульсов определяются по ГОСТ 1516.1-76.

Испытания *внутренней изоляции* проводят трехударным методом. На объект подается по три импульса положительной и отрицательной полярности, сначала полные, а затем срезанные. Интервал времени между импульсами – не менее 1 мин. Изоляция считается выдержавшей испытания, если во время испытания не произошло ее пробоев и не обнаружено повреждений. Методика обнаружения повреждений довольно сложна и обычно проводится осциллографическими методами.

*Внешняя изоляция* оборудования испытывается 15-ударным мето-

дом, когда к объекту с интервалом не менее 1 мин. прикладывается по 15 импульсов обеих полярностей, как полных, так и срезанных. Изоляция считается выдержавшей испытания, если в каждой серии из 15 импульсов было не более двух полных разрядов (перекрытий).

## 7.2. Испытания изоляции кабелей, трансформаторов и высоковольтных вводов

Все виды испытаний можно разделить на три основные группы, различающиеся по назначению и, соответственно, по объему и нормам:

- испытания новых изделий на заводе-изготовителе;
- испытания после прокладки или монтажа нового оборудования, испытания после капитального ремонта;
- периодические профилактические испытания.

Требования по испытаниям изоляции кабелей, трансформаторов и высоковольтных вводов излагаются отдельно для этих трех групп испытаний.

### 1. Кабели

Испытательные напряжения для кабелей устанавливаются в соответствии с ожидаемым уровнем внутренних и грозовых перенапряжений.

*На заводах-изготовителях* маслонаполненные кабели и кабели с маловязкой пропиткой испытывают повышенным напряжением промышленной частоты (около  $2,5U_{ном}$ ). Кабели с вязкой пропиткой и газовые кабели для предотвращения повреждения изоляции испытывают выпрямленным напряжением порядка  $(3,5..4)U_{ном}$ , причем  $U_{ном}$  – линейное при рабочих напряжениях 35 кВ и менее и фазное при рабочих напряжениях 110 кВ и более.

Кроме того, измеряют сопротивление изоляции, а при рабочих напряжениях 6 кВ и более измеряют сопротивление изоляции и  $\text{tg } \delta$  (последнее – при напряжениях от  $0,5U_{ном}$  до  $2U_{ном}$ ).

*После прокладки кабеля, после капитального ремонта и во время профилактических испытаний* изоляцию кабелей испытывают повышенным выпрямленным напряжением. Время испытаний для кабелей напряжением 3..35 кВ составляет 10 мин для кабеля после прокладки и 5 мин после капитального ремонта и во время профилактических испытаний. Для кабелей напряжением 110 кВ время приложения испытательного напряжения – по 15 мин на фазу. Периодичность профилактических испытаний составляет от двух раз в год до 1 раза в три года для разных кабелей. При испытаниях *контролируется ток утечки*, значения которого лежат в пределах от 150 до 800 мкА/км для нормальной изоляции. До и после испытаний измеряется *сопротивление изоляции*.

### 2. Силовые трансформаторы

*На заводе-изготовителе* внутренняя и внешняя изоляция испытываются полными и срезанными **стандартными грозowymi импульсами**, а также переменным напряжением. Обнаружение повреждений продольной изоляции чаще всего проводят осциллографированием тока в нейтрали трансформатора и сравнением осциллограммы с типовой.

Если изоляция нейтрали и линейного вывода одинаковы, то при **испытаниях переменным напряжением** оба конца испытываемой обмотки изолируются и на обмотку подается напряжение от постороннего источника. Если уровень изоляции нейтрали понижен, то испытания проводятся индуктированным **напряжением повышенной частоты** (до 400 Гц) с тем, чтобы можно было бы подавать напряжение порядка  $2U_{ном}$ . Нейтраль при этом заземляется или на нее подается постороннее напряжение той же частоты. Поскольку ЭДС самоиндукции в обмотке пропорциональна частоте,  $E = \omega B S w$ , то без насыщения сердечника, то есть при той же максимальной индукции  $B$ , можно приложить повышенное по сравнению с рабочим испытательное напряжение.

Кроме испытаний повышенным напряжением измеряется  **$tg\delta$ , сопротивление изоляции, емкостные характеристики изоляции**, а полученные на заводе значения используются в эксплуатации в качестве характеристик исходного состояния изоляции.

При испытаниях изоляции должна быть испытана поочередно каждая электрически независимая цепь или параллельная ветвь (в последнем случае – при наличии полной изоляции между ветвями), а испытательное напряжение прикладывается между выводом и заземленным корпусом, все другие обмотки заземляются. Измерения сопротивления изоляции проводят до и после испытаний повышенным напряжением. Схемы контроля изоляции двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов приведены в табл. 5.1.

**Перед первым включением** вновь смонтированного трансформатора измеряют пробивное напряжение трансформаторного масла, сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции, отношение  $C_2/C_{50}$ ,  $tg \delta$  (значение которого сравнивают с результатами заводских испытаний).

**Во время периодических профилактических испытаний** проводят те же испытания, что и перед первым включением, но допустимые значения  $tg\delta$  при этом увеличены. Испытания изоляции повышенным напряжением при профилактических испытаниях предполагаются для обмоток напряжением 35 кВ и ниже, значения испытательных напряжений при этом снижаются до 0,85-0,9 значения заводского испытательного напряжения.

**Периодичность** профилактических испытаний для разных трансформаторов колеблется от 1 раза в год до 1 раза в 4 года.

### **3. Вводы высокого напряжения**

Основной вид контроля – **периодический осмотр** (от одного раза в трое суток до одного раза в шесть месяцев). У вводов напряжением 110-

220 кВ с помощью специального измерительного конденсатора измеряют  $\text{tg}\delta$  и проводят *анализ и испытания проб масла*, измеряют *сопротивление изоляции* между специальной измерительной обкладкой ввода и соединительной втулкой. *Периодичность* таких испытаний для разных вводов разная, но не реже одного раза в 4 года.

## **РЕЗЮМЕ**

Испытания изоляции повышенным напряжением позволяют выявить локальные дефекты, не обнаруживаемые иными методами. Этот метод испытаний является прямым способом контроля способности изоляции выдерживать воздействия перенапряжений. При испытаниях повышенным напряжением используются три основных вида испытательных напряжений: повышенное напряжение промышленной частоты, выпрямленное постоянное напряжение и импульсное испытательное напряжение.

Все виды испытаний делятся на три основные группы: испытания новых изделий на заводе-изготовителе, испытания после прокладки или монтажа нового оборудования и после капитального ремонта, периодические профилактические испытания.

Изоляцию кабелей испытывают повышенным напряжением, измеряют сопротивление изоляции, а в некоторых случаях измеряют  $\text{tg}\delta$  изоляции.

У силовых трансформаторов измеряют пробивное напряжение трансформаторного масла, сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции, отношение  $C_2/C_{50}$ ,  $\text{tg}\delta$ , проводят испытания повышенным напряжением для обмоток напряжением 35 кВ и ниже. На заводе-изготовителе внутренняя и внешняя изоляция испытываются полными и срезанными стандартными грозовыми импульсами, а также переменным напряжением.

Основной вид контроля вводов высокого напряжения – периодический осмотр. У вводов напряжением 110-220 кВ измеряют  $\text{tg}\delta$  и проводят анализ и испытания проб масла и измерение сопротивления изоляции.

## **Контрольные вопросы**

1. Зачем испытывают изоляцию электрооборудования повышенным напряжением?
2. Назовите основные виды испытательных напряжений и их особенности.
3. Каковы основные принципы испытаний изоляции переменным напряжением?
4. Как испытывают изоляцию выпрямленным напряжением?
5. Какова методика испытаний изоляции импульсным напряжением?



## Лекция 8. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

### 8.1. Повреждаемость изоляции контактной сети

В системе электроснабжения железной дороги контактная сеть является *единственным нерезервируемым элементом*, поэтому к ней предъявляются наиболее высокие требования по надежности функционирования.

Проблема изоляции проявляется при электрификации на переменном токе в связи с более высоким уровнем напряжения. Неисправности контактной сети составляют около четверти всех отказов устройств электроснабжения, а основной причиной неисправностей контактной сети является повреждение изоляторов – по ВСЖД в последние годы *около одной трети* (35%), иногда доля повреждений изоляторов в неисправностях контактной сети доходила до половины всех неисправностей.

Основным фактором, определяющим повреждаемость изоляторов контактной сети, являются тяжелые условия их эксплуатации, связанные с частыми механическими ударами и вибрацией. *Изоляция контактной сети составлена* гирляндами подвесных тарельчатых изоляторов, стержневыми фиксаторными, консольными и опорными изоляторами и секционирующими изоляторами секционных изоляторов. Разрядные напряжения различных элементов контактной сети, весьма высокие в нормальных условиях, могут снижаться до неприемлемо низких значений. Электрическая прочность *воздушных промежутков* достаточно высока и слабо зависит от атмосферных условий; так, воздушный промежуток провод – стойка опоры имеет электрическую прочность около 4 кВ-ампл/см. Изменения давления и температуры могут изменять эти значения на 15..20%, а увеличение абсолютной влажности воздуха способно повысить это значение на 6..8%.

Отдельные тарельчатые изоляторы наиболее распространенных типов имеют сухоразрядное напряжение перекрытия около 70..75 кВ эффективного значения, а мокроразрядное напряжение для чистого изолятора составляет около 40 кВ. Вместе с тем гирлянда из трех изоляторов имеет сухоразрядное напряжение перекрытия около 150 кВ на частоте 50 Гц (эффективное значение) и примерно 300 кВ импульсное напряжение перекрытия. Загрязнения (песок, частицы сыпучих грузов, металлическая пыль) резко снижают напряжения перекрытия изоляторов. Особенно большие неприятности доставляют загрязнения от химических предприятий, часто приводящие к разрушению материала изоляторов. Так, изоляторы типа ИФС, имеющие сухоразрядное напряжение около 140 кВ эфф., при загрязнении могут снижать мокроразрядное напряжение до 25..30 кВ. Полимерные изоляторы наиболее стойки к воздействию загрязнений, обладая от-

талкивающими свойствами по отношению к загрязнениям и влаге.

**Основными видами повреждений** изоляции контактной сети являются перекрытия изоляторов из-за их загрязнения, пробой изоляторов из-за нарушения изоляционной части, перекрытия изоляторов птицами, механические изломы стержневых изоляторов. Этим повреждениям способствуют скрытые дефекты изоляторов, наличие влаги в атмосфере и попадание ее в армировку изолятора, нагрев изоляторов солнечными лучами (почти 100% случаев пробоя изоляции происходит в теплый период года), загрязнение атмосферы различными химическими веществами, по которым происходит поверхностное перекрытие. Опыт эксплуатации показал, что срок надежной работы стержневого фарфорового изолятора не превышает 15-20 лет, после чего его необходимо заменить, иначе снижение механической прочности фарфора приводит к изломам изолятора.

Наибольшее количество повреждений приходится на **гирлянды тарельчатых изоляторов** – прежде всего потому, что их больше всего. Тарельчатые фарфоровые изоляторы гораздо менее надежны по сравнению со стеклянными, поскольку в фарфоре возникают трещины, не обнаруживаемые при осмотре и приводящие к полной потере изолятором изолирующих свойств. Трещины в стеклянном изоляторе приводят к осыпанию юбки изолятора, и дефект становится явным. Накопление дефектных изоляторов приводит к многочисленным перекрытиям, особенно в грозовой сезон, и к нарушению движения поездов. Такая ситуация требует проведения периодического контроля изоляции контактной сети.

## 8.2. Основные методы контроля изоляции контактной сети

Изоляторы контактной сети подвергаются контролю перед установкой и в процессе эксплуатации.

**Фарфоровые тарельчатые изоляторы перед установкой** и перед передачей в аварийный запас испытываются напряжением 50 кВ промышленной частоты в течение 1 мин, и мегаомметром на напряжение 2,5 кВ измеряют сопротивление изоляции, которое должно быть не менее 300 МОм. Электрическим испытаниям, измерениям сопротивления изоляции и маркировке не подвергаются стеклянные, полимерные и стержневые фарфоровые изоляторы. Изоляторы и изолирующие вставки контактной сети перед установкой осматривают и очищают от загрязнения.

Не допускаются к монтажу и заменяются в процессе эксплуатации изоляторы, имеющие следующие дефекты:

- трещины в оконцевателях, качание, сползание или проворачивание их в заделке, видимое искривление (несоосность) деталей у всех типов изоляторов;
- сколы фарфора ребер общей площадью более 3 см<sup>2</sup> или видимые

трещины;

- в стекле – трещины, сколы, посечки, морщины, складки, натеки, свищи, видимые внутренние газовые пузыри и инородные включения;
- у полимерных изоляторов – механические повреждения (надрезы, проколы, кратеры, ссадины), разгерметизация защитного чехла или покрытия, следы токопроводящих дорожек (треков) на длине более одной трети пути утечки;
- коррозия стержня тарельчатого изолятора до диаметра 12 мм.

Коэффициент запаса механической прочности изоляторов по отношению к их нормированной разрушающей силе должен быть не менее 5,0 при средней эксплуатационной нагрузке и 2,7 — при наибольшей рабочей нагрузке.

**Основным видом контроля изоляции** контактной сети в процессе эксплуатации являются **осмотры** при обходах и объездах вагоном-лабораторией.

Диагностирование фарфоровых тарельчатых изоляторов производится **приборами дистанционного контроля** их состояния (тепловизорами, электронно-оптическими дефектоскопами типа «Филин» и др.) или **измерительными штангами**.

**Дефектировка штангой** производится на контактной сети переменного тока непосредственным измерением фактического напряжения на каждом из изоляторов гирлянды с изолирующей съёмной вышки. Цель измерений – выявление отдельных «нулевых» изоляторов до пробоя всей гирлянды и потери ею механической прочности. Дефектным считают изолятор, падение напряжения на котором равно или меньше значений, приведенных в табл. 8.1. Гирлянды с выявленными нулевыми изоляторами немедленно заменяются. Работа по этой технологии достаточно трудоемкая и опасна для персонала.

Появившиеся в 80-х годах и рекомендуемые ПУТЭКС для применения **электронно-оптические дефектоскопы** типа «Филин» при попытках их освоения на Восточно-Сибирской железной дороге проявили себя неудовлетворительно. Работа с ними возможна только в темное время суток, надежность выявления дефектной гирлянды «Филином» оказалась низкой.

Таблица 8.1

Предельно допустимые падения напряжения на изоляторах

Число изоляторов в гирлянде	Падение напряжения, кВ, на изоляторе, считая от заземленной конструкции					
	1-м	2-м	3-м	4-м	5-м	6-м
3	4,0	4,0	5,0	-	-	-
4	3,0	3,0	3,0	5,0	-	-
5	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	-
6	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	3,0

Приборы контроля оборудования в инфракрасной области спектра (*тепловизоры*) нашли ограниченное практическое применение ввиду их громоздкости. Такой прибор установлен только в дорожном вагон-лаборатории для испытаний контактной сети и используется при периодических объездах участков вагоном. Приборы тепловизионного контроля последних модификаций являются цифровыми и обычно работают в паре с компьютером.

Удовлетворительные результаты при контроле изоляции контактной сети показывают *приборы ультразвукового контроля* типа УД-8. Прибор УД-8 был первоначально разработан ТОО «Сигнал» (гор. Нижний Новгород) для выявления гирлянд, имеющих дефектные изоляторы, на воздушных ЛЭП напряжением 35, 110, 220 кВ, которые эксплуатируются энергосистемами. Восточно-Сибирская железная дорога в числе первых применила этот прибор для той же цели, но на контактной сети. УД-8 предназначен для определения мест искровых разрядов и коронирования, а также мест утечек газов и жидкостей. Принцип действия прибора УД-8 основан на приеме ультразвуковых колебаний от контролируемых изоляторов в диапазоне частот 39-41 кГц с выводом сигнала на стрелочный индикатор и на головной телефон оператора. Работа ультразвукового детектора основана на эффекте повышения напряжения на изоляторах гирлянды с увеличением интенсивности поверхностных частичных разрядов при наличии «нулевых» изоляторов. При повышении напряжения на изоляторе повышается и интенсивность ультразвукового фона, что и регистрируется прибором. Если же дефект изолятора проявляется в форме незавершенного пробоя, то это приводит к резкому увеличению интенсивности сигнала в ультразвуковом диапазоне. При напряжении более 20 кВ высоковольтный разряд обнаруживается на расстоянии до 20-30 м, а сам прибор УД-8 достаточно компактен и легок.

### **8.3. Методы повышения надежности изоляции контактной сети**

Методы повышения надежности изоляции контактной сети сводятся к следующему:

- усиление изоляции в местах, где наблюдались перекрытия изоляции, путем увеличения числа изоляторов и применением полимерных изоляторов;
- обмыв изоляторов струей воды передвижными установками; при малой эффективности обмывки – чистка вручную или замена изоляторов;
- временное понижение напряжения в контактной сети в зоне повышенного загрязнения атмосферы с дистанционным контролем изоля-

- ции;
- покрытие изоляторов гидрофобными пастами и смазочными материалами, рекомендуется в зонах цементных и химических загрязнений.

### ***РЕЗЮМЕ***

Контактная сеть является нерезервируемым элементом, поэтому к ее изоляции предъявляются повышенные требования по надежности функционирования; вместе с тем основной причиной неисправностей контактной сети является именно повреждения изоляторов – около одной трети всех неисправностей. Основными видами повреждений изоляции контактной сети являются перекрытия изоляторов из-за их загрязнения, пробой изоляторов из-за нарушения изоляционной части, перекрытия изоляторов птицами, механические изломы.

Фарфоровые тарельчатые изоляторы перед установкой испытываются повышенным напряжением и контролируются мегаомметром. Остальные изоляторы и изолирующие вставки контактной сети перед установкой осматривают и очищают от загрязнения.

Основными видами контроля изоляции контактной сети являются осмотры при обходах и объездах вагоном-лабораторией, диагностирование изоляторов производится приборами дистанционного контроля их состояния (приборами ультразвукового контроля, тепловизорами, электронно-оптическими дефектоскопами типа «Филин») или измерительными штангами.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие виды дефектов являются характерными для изоляции контактной сети?
2. Назовите виды входного контроля изоляторов контактной сети перед установкой.
3. Перечислите виды эксплуатационного контроля изоляции контактной сети.

## **Лекция 9. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОГО ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

### **9.1. Испытательные установки высокого переменного напряжения**

Испытательные установки высокого переменного напряжения *предназначены* для получения высокого регулируемого переменного напряже-

ния, с помощью которого испытывают изоляцию повышенным напряжением.

Основным узлом установки является *испытательный трансформатор*, отличающийся от силового трансформатора аналогичного класса напряжения малой мощностью, ограниченным временем включения, малым запасом электрической прочности изоляции. Испытательные трансформаторы имеют большой коэффициент трансформации и значительную индуктивность рассеяния. Испытательные трансформаторы большей частью являются однофазными и выполняются в трех модификациях: в изолирующем корпусе, в металлическом корпусе с одним вводом и в металлическом корпусе с двумя вводами.

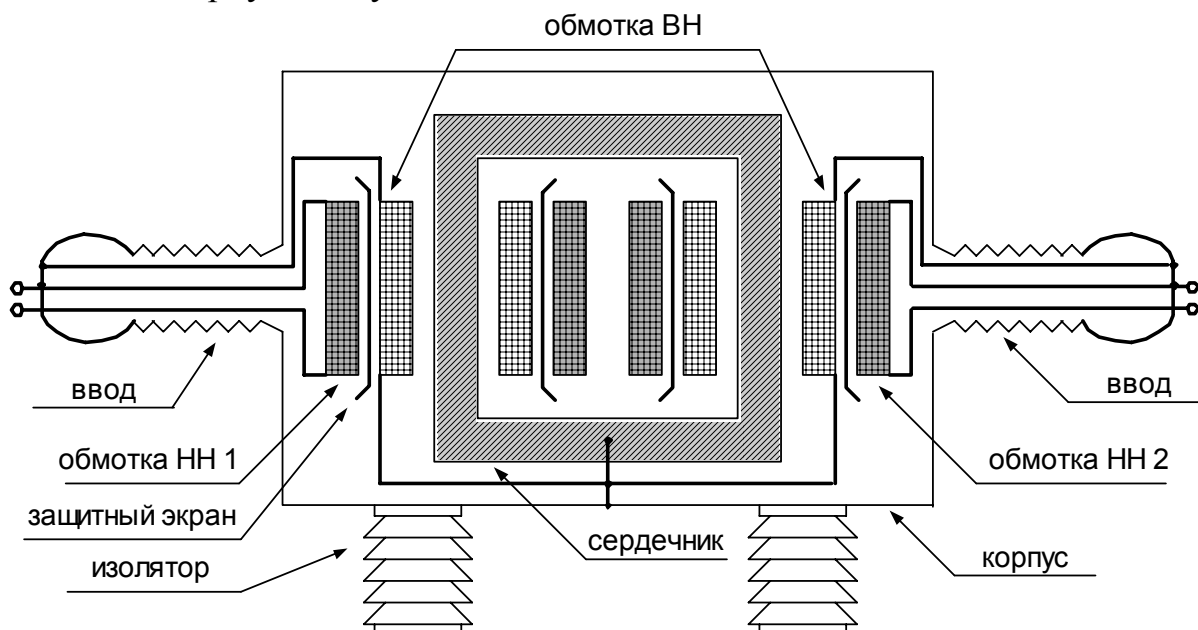


Рис. 9.1. Испытательный трансформатор с двумя вводами

В связи со сложностью изготовления ввода на большое напряжение максимальное напряжение, на которое изготовлен *трансформатор с одним вводом*, составляет 1200 кВ, его общая высота составляет 15.5 м, из которой наружная часть ввода составляет более 9 м.

Конструкция испытательного трансформатора упрощается, если для вывода высокого напряжения из бака используются *два ввода*, каждый из которых рассчитан на половину номинального напряжения (рис. 9.1). Обмотка низкого напряжения располагается на одном стержне сердечника и изолируется от него на половину номинального напряжения. Обмотка высокого напряжения состоит из двух частей, расположенных на обоих стержнях магнитопровода. Средняя точка обмотки ВН соединяется с магнитопроводом и баком трансформатора. Один из концов обмотки ВН заземляется, и бак находится под половинным напряжением трансформатора. Между обмотками ВН и НН располагают незамкнутый проводящий защитный экран, препятствующий передаче импульсов напряжения через

межобмоточную емкость при перекрытии испытуемой изоляции. Кроме того, в трансформаторе обычно имеется не изображенная на рис. 9.1 обмотка связи, состоящая из двух параллельно соединенных друг с другом частей, расположенных на разных сторонах сердечника. Эта обмотка улучшает связь полуобмоток трансформатора и снижает напряжение короткого замыкания.

Вторая обмотка НН используется при *соединении трансформаторов в каскад* с последовательным питанием для получения сверхвысоких испытательных напряжений. Обмотки ВН каскада соединяются последовательно, а питание каждого последующего трансформатора осуществляется через предыдущий (рис. 9.2). При этом первый трансформатор оказывается более загруженным; для разгрузки иногда применяют схемы с параллельным питанием повышающих трансформаторов через изолирующие трансформаторы.

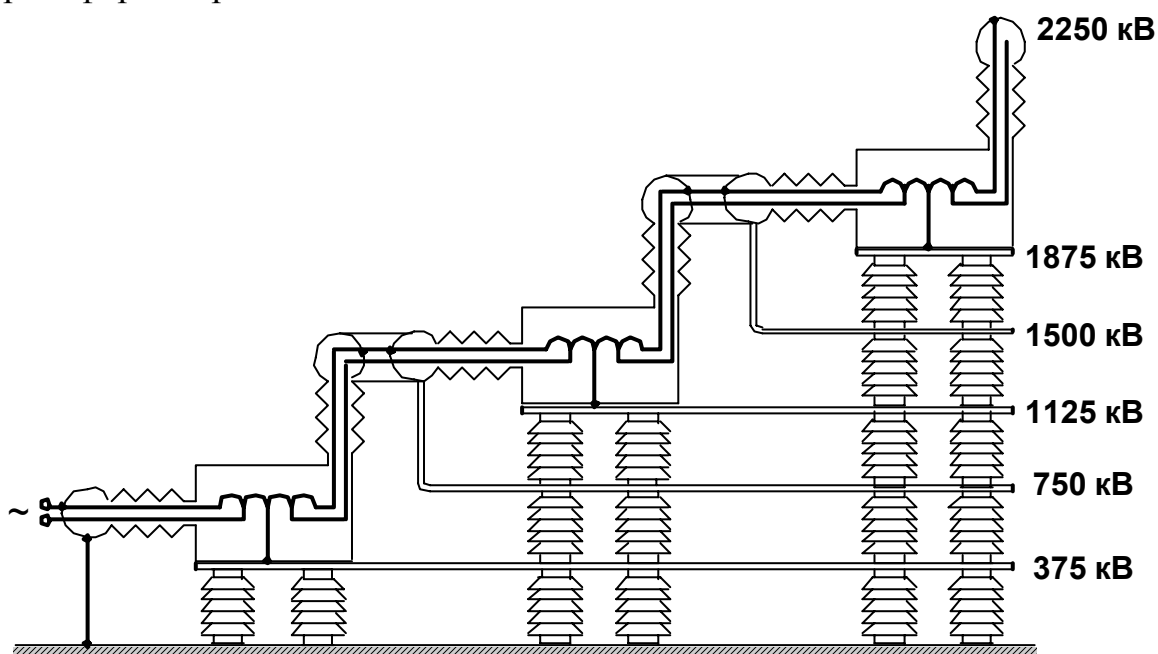


Рис. 9.2. Схема каскада трансформаторов 3x750 кВ

Изоляторы схемы рис. 9.2 связаны друг с другом металлическими рамами для выравнивания распределения напряжения по колонкам изоляторов. Провода, соединяющие трансформаторы друг с другом, помещены в экраны, имеющие тот же потенциал, что и провода, но с большим радиусом, что препятствует возникновению короны.

Упрощенная схема испытательной установки переменного напряжения показана на рис. 9.3. Схема содержит испытательный трансформатор Т2 (или каскад трансформаторов), регулировочный трансформатор Т1, защитный резистор R1, предназначенный для демпфирования колебаний при пробое изоляции и снижения возникающих в обмотке трансформатора перенапряжений, и измерительные приборы. Измерение напряжения на вы-

ходе установки может производиться по первичному напряжению испытательного трансформатора, как показано на рис. 9.3, а также вольтметр может присоединяться на отвод высоковольтной обмотки. Другие возможности измерения напряжения рассматриваются далее.

**Для регулирования напряжения** применяются регулировочные автотрансформаторы, индукционные регуляторы и двигатель-генераторные установки. Максимальная мощность регулировочных автотрансформаторов обычно не превышает 50-100 кВА. При больших мощностях для плавного регулирования напряжения могут быть использованы индукционные регуляторы, представляющие собой трансформаторы с взаимно перемещающимися обмотками, не имеющие скользящих контактов и обеспечивающие плавное регулирование напряжения. Двигатель-генераторные установки применяют для питания трансформаторов напряжением 500 кВ и выше и трансформаторных каскадов. Эти установки обеспечивают плавное регулирование напряжения, независимость испытательного напряжения от колебаний напряжения сети и синусоидальную форму испытательного напряжения.

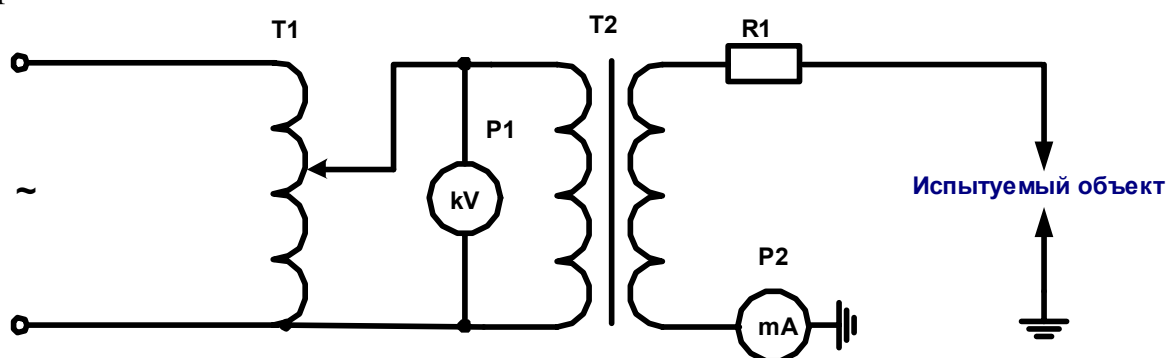


Рис. 9.3. Схема испытательной установки переменного напряжения

Отношение амплитудного значения испытательного напряжения к действующему должно составлять  $\sqrt{2} \pm 0.07$ , а частота испытательного напряжения не должна отличаться от 50 Гц более чем на 10%.

## 9.2. Испытательные установки высокого постоянного напряжения

Для получения высокого постоянного напряжения используют выпрямительные установки и электростатические генераторы. Последние позволяют получать наиболее высокие напряжения – вплоть до 30 МВ – но при малых токах, не более 1 мА. Поэтому при испытаниях изоляции применяют в основном выпрямительные установки.

Выпрямительные установки в принципе могут быть поделены на две группы: установки однополупериодного выпрямления и установки, построенные по схемам умножения напряжения.



**В однополупериодных выпрямителях** высокое переменное напряжение преобразуется в высокое постоянное напряжение с помощью выпрямителя и сглаживающего устройства. Схема устройства изображена на рис. 9.4.

В качестве выпрямительных элементов применяют последовательно включенные полупроводниковые диоды. Основную трудность составляет высокое обратное напряжение ( $2U_m$  в однополупериодных схемах), которое должно быть равномерно распределено по отдельным диодам. Равномерности распределения достигают либо шунтированием диодов резисторами или конденсаторами, либо использованием диодов с лавинной обратной характеристикой (аналоги стабилитронов).

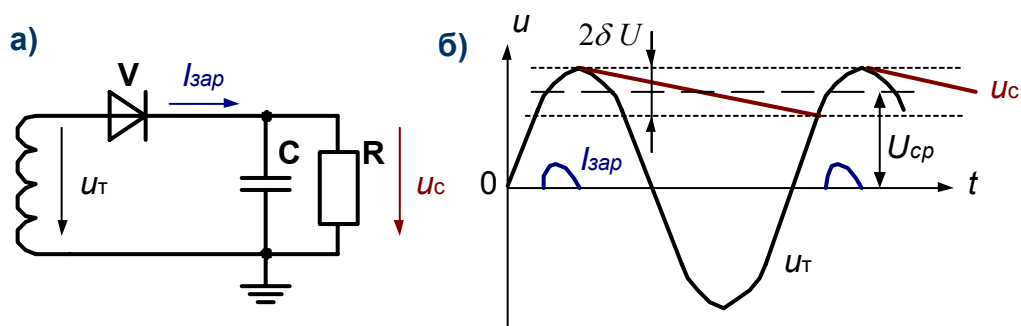


Рис. 9.4. Однополупериодный выпрямитель

Напряжение на испытываемой изоляции при схеме рис. 9.4 пульсирует вблизи среднего значения.

**Схемы умножения напряжения** позволяют получить высокое постоянное напряжение от источника с гораздо меньшим напряжением в сопоставлении с однополупериодным выпрямителем. На рис. 9.5 показана схема с удвоением напряжения, в которой  $C1$  заряжается примерно до амплитудного значения в те полупериоды, в которые вентиль  $V1$  открыт. В полупериоды противоположной полярности открывается вентиль  $V2$  и конденсатор  $C2$  оказывается включенным на суммарное напряжение обмотки трансформатора и заряженного конденсатора  $C1$ . При отсутствии нагрузки конденсатор  $C2$  заряжается до двойной амплитуды напряжения трансформатора. В этой схеме обратное напряжение на каждом из диодов равно удвоенной амплитуде напряжения трансформатора.

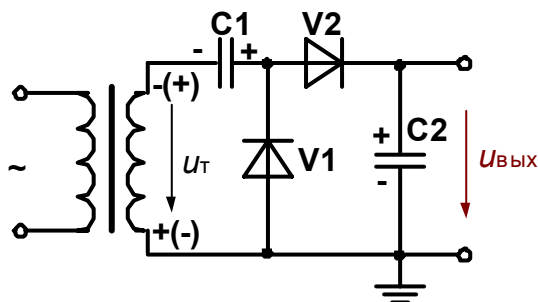


Рис. 9.5. Схема выпрямителя с удвоением напряжения

Максимальное напряжение, которое получено на выпрямительной установке, составляет 1.5 МВ.

В качестве характеристик постоянного напряжения, содержащего пульсации, используют следующие характеристики:

- полярность напряжения;
- среднее значение напряжения  $U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$ ;
- коэффициент пульсаций  $\delta U = 0.5(U_{max} - U_{min})$ , который часто выражают в процентах от среднего значения.

Согласно рекомендациям Международной электротехнической комиссии, пульсации не должны превышать 5% от среднего значения напряжения.

### ***РЕЗЮМЕ***

Испытательные установки высокого переменного напряжения предназначены для получения высокого регулируемого переменного напряжения, с помощью которого испытывают изоляцию. Основным узлом установки является испытательный трансформатор, отличающийся малой мощностью, ограниченным временем включения, малым запасом электрической прочности изоляции. Для получения напряжений выше 1000 кВ используют каскадное соединение испытательных трансформаторов. Схема испытательной установки содержит испытательный трансформатор или каскад, регулировочный трансформатор и защитный резистор.

Для получения высокого постоянного напряжения при испытаниях изоляции используют выпрямительные установки. Выпрямительные установки делятся на две группы: установки однополупериодного выпрямления и установки, построенные по схемам умножения напряжения. Основная проблема высоковольтного выпрямителя – выравнивание обратного напряжения на последовательно включенных вентиллях.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие типы трансформаторов Вам известны? Чем отличается испытательный трансформатор от других трансформаторов?
2. Поясните принцип работы каскада трансформаторов.
3. Объясните назначение основных узлов испытательной установки высокого переменного напряжения.
4. Как устроена выпрямительная установка высокого постоянного напряжения?

## Лекция 10. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

### 10.1. Генераторы коммутационных импульсов

При коммутациях высоковольтных цепей возникают импульсы перенапряжений, имеющие время нарастания до 1000 микросекунд и длительность до полуспада порядка нескольких миллисекунд. Для испытаний устойчивости изоляции к таким перенапряжениям используются генераторы коммутационных импульсов, построенные по разнообразным схемам. Одна из простейших схем генератора коммутационных импульсов показана на рис. 10.1.

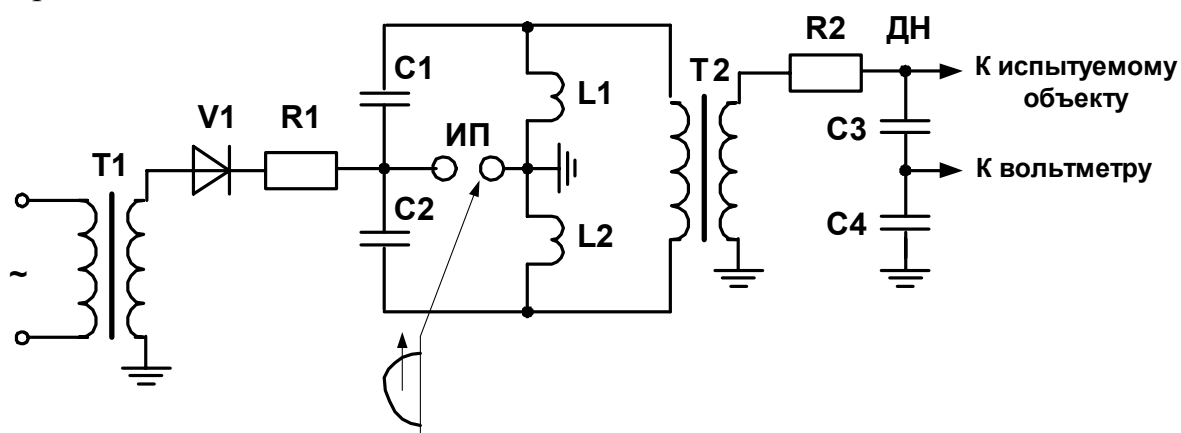


Рис. 10.1. Схема генератора коммутационных импульсов

Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  этой схемы заряжаются от высоковольтного выпрямителя  $V1$ . Запуск производится путем подачи поджигающего импульса напряжения на искровой промежуток ИП. После пробоя этого промежутка в двух отдельных контурах  $L1C1$  и  $L2C2$  начинаются затухающие колебания. Частоты контуров выбраны таким образом, чтобы  $f_2 = (3..5)f_1$ . Импульсный трансформатор  $T2$  дополнительно увеличивает напряжение, причем на его вторичной обмотке создается разность напряжений двух контуров (рис. 10.2). Длительность фронта такого импульса немного меньше половины периода второго контура, то есть  $\tau_\phi = \frac{0.4}{f_2}$ .

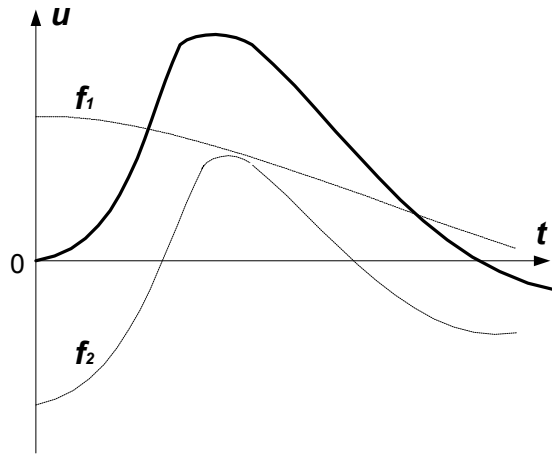


Рис. 10.2. Форма выходного импульса генератора

Испытания коммутационными импульсами проводятся аналогично испытаниям грозовыми импульсами. Стандартными коммутационными импульсами по ГОСТ 1516.2-97 являются аperiodический импульс длительностью  $2.5 \pm 0.5$  мс с фронтом  $250 \pm 50$  мкс и колебательный импульс длительностью  $7.5 \pm 2.5$  мс с фронтом  $4.0 \pm 1.0$  мс.

## 10.2. Генераторы импульсных напряжений

Испытания изоляции оборудования стандартными грозовыми импульсами, имеющими длительность фронта 1.2 мкс и длительность до полупада 50 мкс, проводят с помощью генераторов импульсных напряжений (ГИН). Схемы ГИН достаточно разнообразны, однако испытания изоляции обыкновенно проводят генераторами с емкостными накопителями, обладающими весьма небольшими паразитными индуктивностями элементов.

Стандартный грозовой импульс в емкостном ГИН *получают* путем разряда высоковольтного конденсатора на резистор, а сравнительно пологий фронт в 1.2 мкс формируют за счет заряжения вспомогательного конденсатора через дополнительный резистор. Таким образом, минимальное количество элементов ГИН без учета зарядного устройства и коммутатора составляет четыре (рис. 10.3); такие схемы применяют при напряжениях менее 100 кВ.

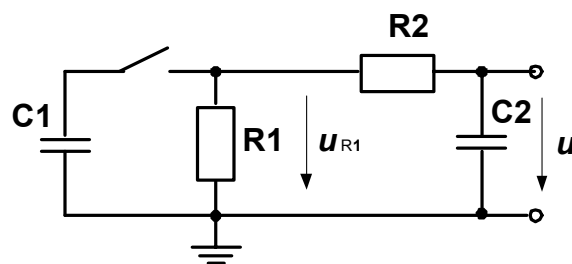


Рис. 10.3. Схема одноступенчатого ГИН

Схема рис. 10.3 содержит основной предварительно заряженный конденсатор  $C_1$ , основной разрядный резистор  $R_1$  и элементы формирования фронта  $C_2$  и  $R_2$ . Для формирования стандартного грозового импульса требуется, чтобы постоянная времени разряда основного конденсатора  $\tau_1 = C_1 R_1$  была много больше постоянной времени заряжения конденсатора фронта  $\tau_2 = C_2 R_2$ . Поэтому можно считать, что в начальные моменты времени первоначальное напряжение на конденсаторе  $C_1$   $U_0$  резко уменьшается из-за того, что **параллельно конденсатору  $C_1$  подключается конденсатор  $C_2$** , так что начальное напряжение процесса разряда оказывается несколько меньше,  $U_0' = \frac{q}{C_1 + C_2} = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$ ; здесь  $q = C_1 U_0$  – начальный заряд конденсатора  $C_1$ . Приближенно можно считать, что заряджение конденсатора  $C_2$  происходит от источника постоянного напряжения величиной  $U_0'$ :

$$u = U_0' [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_2})] = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_2})].$$

В этой формуле единица в скобках соответствует неизменному напряжению источника постоянного напряжения; поскольку в схеме ГИН напряжение достаточно медленно по сравнению с фронтом уменьшается с течением времени из-за разряда конденсатора на резистор  $R_1$ , то эту **единицу следует заменить экспонентой  $\exp(-\frac{t}{\tau_1})$** , отображающую простейший процесс разряда конденсатора на резистор:

$$u = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} [\exp(-\frac{t}{\tau_1}) - \exp(-\frac{t}{\tau_2})].$$

Таким образом, форма импульса ГИН отображается разностью двух экспонент, из которых первая отображает спад импульса за счет разряда основного конденсатора ГИН на разрядный резистор, а вторая – фронт импульса, образуемый заряджением фронтового конденсатора.

Величина  $\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$ , показывающая степень использования начального напряжения ГИН, называется **коэффициентом использования ГИН**.

Иногда по конструктивным соображениям фронтовой резистор  $R_2$  включают перед основным резистором  $R_1$  (рис. 10.4). В этом случае напряжение на выходе ГИН уменьшается еще и за счет действия делителя  $R_1 R_2$ , так что коэффициент использования оказывается меньше на коэффициент деления этого делителя,  $\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ .

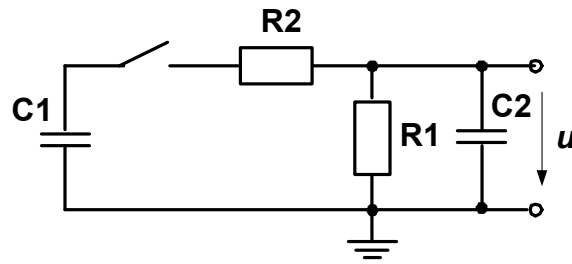


Рис. 10.4. Вариант схемы одноступенчатого ГИН

Схему ГИН по рис. 10.3 или 10.4 иногда называют одноступенчатой. Использование подобной схемы при напряжении более 250-300 кВ становится неприемлемым из-за больших затрат на выпрямитель и больших размеров элементов. Получение импульсов высокого напряжения с использованием сравнительно низковольтных зарядных устройств и конденсаторов возможно при использовании *многоступенчатых (каскадных) схем* ГИН. В многоступенчатой схеме несколько конденсаторов заряжаются от зарядного устройства параллельно, а при разряде переключаются в последовательное соединение со сложением напряжений на них. Переключение обычно производится с помощью искровых промежутков.

На рис. 10.5 показана схема четырехступенчатого ГИН. ГИН имеет зарядное устройство на трансформаторе Т1 и элементах  $R_{\text{защ}}$  и V1, основные конденсаторы С1, шаровые разрядники FV1-FV5, демпфирующие резисторы  $R_{\text{д}}$  и элементы формирования фронта R2C2. Расстояния между шарами промежутков FV1-FV4 подобраны так, что их пробивное напряжение немного больше зарядного напряжения. Символами  $C_{\text{п}}$  обозначены паразитные емкости оборудования, играющие существенную роль в работе генератора.

Конденсаторы ГИН заряжаются от высоковольтного выпрямителя через зарядные резисторы  $R_{\text{зар}}$  параллельно до одинакового напряжения  $U_0$ . На промежуток FV1 подается дополнительный поджигающий импульс напряжения, так что FV1 пробивается. Потенциал точки 3 практически мгновенно становится равным  $U_0$ , поскольку величина сопротивления резистора  $R_{\text{д}}$  мала и мала постоянная времени цепочки  $R_{\text{д}}C_{\text{п}}$ . Потенциал точки 4 по отношению к земле при этом равен сумме потенциала точки 3 и напряжения  $U_0$ , а потенциал точки 5 остается нулевым, поскольку паразитная емкость  $C_{\text{п}}$  не успевает зарядиться через сравнительно высокоомный резистор  $R_{\text{зар}}$ . Напряжение на промежутке FV2 оказывается равным  $2U_0$  и промежуток FV2 пробивается, что приводит в первый момент времени к появлению напряжения  $3U_0$  на промежутке FV3. Аналогично пробивается и промежуток FV4, так что все четыре конденсатора оказываются соединенными последовательно через искровые промежутки и резисторы  $R_{\text{д}}$ . Резистор  $R_{\text{д}}$  используется для демпфирования колебаний в контуре C1-FV1-СП, в котором из-за наличия индуктивностей проводов могут возникнуть зату-

хающие колебания с большой амплитудой.

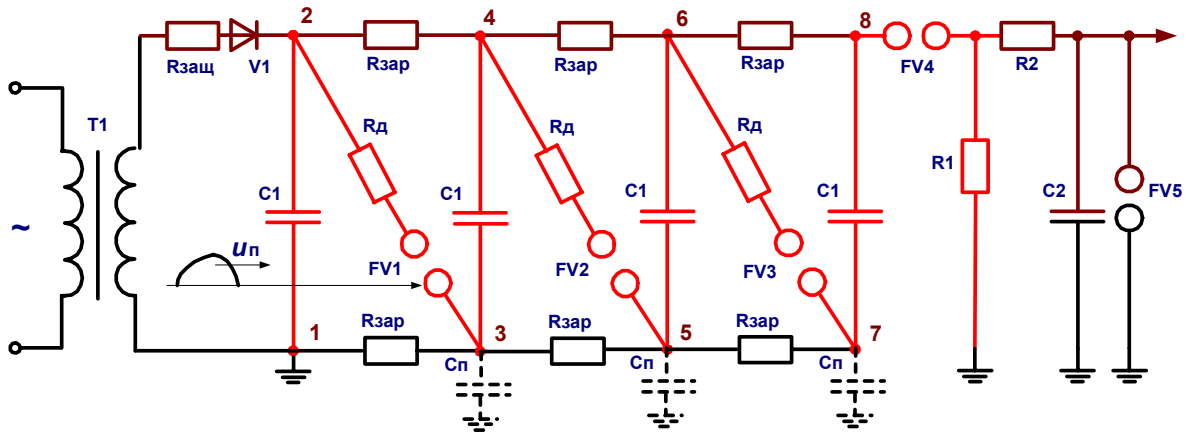


Рис. 10.5. Схема четырехступенчатого ГИН

Напряжение  $4U_0$  (или  $nU_0$  при  $n$  конденсаторах) называется **суммарным зарядным напряжением** ГИН; другой важной характеристикой ГИН является наибольшее значение запасаемой генератором энергии  $\frac{nCU_{ном}^2}{2}$ .

При изменении зарядного напряжения требуется перенастройка искровых промежутков.

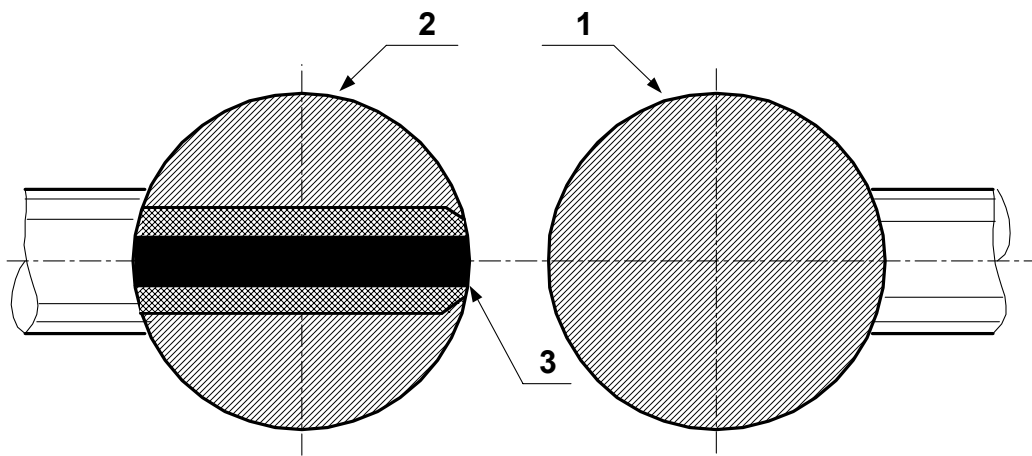


Рис. 10.6. Устройство тригatronа

В качестве пускового промежутка FV1 обычно используется трехэлектродный разрядник (тригatron). На рис. 10.6 представлено сечение тригatronа; при подаче поджигающего импульса напряжения между электродами 2 и 3 промежуток между ними пробивается, создавая область ионизации в основном разрядном промежутке, из-за чего пробивается и основной промежуток между электродами 1 и 2.

Испытания изоляции проводятся как полными, так и срезанными импульсами напряжения. Искровой промежуток FV5 по рис. 10.5 служит для получения срезанного импульса, для чего на него через 2..5 мкс после

срабатывания генератора подается импульс поджига, промежуток пробивается и срезает импульс ГИН.

### ***РЕЗЮМЕ***

Для испытания изоляции коммутационными импульсами напряжения используют генераторы коммутационных импульсов, которые могут быть выполнены на базе колебательных контуров с повышающими импульсными трансформаторами.

Стандартные грозовые импульсы получают путем разряда заряженного высоковольтного конденсатора на резистор; фронт импульса формируют путем заряжения дополнительного конденсатора через дополнительный фронтный резистор. Для получения импульсов напряжением более 250-300 кВ используют многоступенчатые схемы ГИН, в которой несколько конденсаторов заряжаются от зарядного устройства параллельно, а при разряде с помощью искровых промежутков переключаются в последовательное соединение со сложением напряжений на конденсаторах.

### **Контрольные вопросы**

1. Приведите упрощенную схему генератора коммутационных импульсов и объясните принцип его действия.
2. Приведите упрощенную схему генератора стандартных грозовых импульсов, объясните принцип его действия и форму получаемых импульсов.
3. Поясните принцип работы многоступенчатого генератора импульсов.

## **Лекция 11. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

### **11.1. Измерение высоких постоянных напряжений**

Для измерения высоких постоянных напряжений используется три основных метода: измерение с помощью измерительного шарового разрядника, измерение электростатическим вольтметром и измерение с помощью добавочных резисторов.

*Измерительный шаровой разрядник* представляет собой два металлических шара с хорошо обработанными поверхностями и с возможностью изменения расстояния между шарами. Этот разрядник считается очень надежным прибором для измерения постоянного напряжения, а также для измерения амплитуды переменного и импульсного напряжений. Разброс разрядных напряжений шарового разрядника не превышает  $\pm 3\%$ , и при соблюдении условий измерения напряжения такова же и погрешность из-



мерения напряжения.

Возможность измерения основана на законе Пашена, который связывает пробивное напряжение промежутка с расстоянием между поверхностями шаров. Зависимости пробивных напряжений от расстояния для шаров разных диаметров приведены в специальных таблицах, полученных путем тщательной обработки многочисленных экспериментальных данных. Таблицы составлены для давления воздуха 760 мм рт.ст. и температуры 20°C. При других атмосферных условиях требуется корректировка табличного значения пробивного напряжения на относительную плотность воздуха.

Для защиты поверхности шаров от оплавления при пробое последовательно с разрядником устанавливается резистор сопротивлением, выбираемым из соотношения 1..10 Ом/В.

Если по шаровому разряднику градуируется другой измерительный прибор (электростатический киловольтметр или система с добавочным резистором), то расстояние между шарами выставляется на напряжение, на которое рассчитывается градуируемое устройство и напряжение медленно повышается до пробоя шарового разрядника.

Если проводятся измерения самим разрядником, то шары медленно сближаются до пробоя. По таблице для данного диаметра шаров из расстояния определяют разрядное напряжение, которое умножают на поправочный коэффициент, равный относительной плотности воздуха  $\delta = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}$ , если последняя отличается от единицы не более чем на 10% (то есть искоемое пробивное напряжение равно табличному значению, умноженному на относительную плотность воздуха).

**Электростатический вольтметр** представляет собой конденсатор, одна из пластин которого подвижна и закреплена на пружине. Сила взаимодействия пластин определяется согласно закону Кулона произведением их зарядов, то есть  $F = kq^2$ , где  $q$  – заряд одной из пластин,  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от расстояния между электродами. Поскольку  $q = CU$ , где  $C$  – емкость конденсатора,  $U$  – напряжение между пластинами, то  $F = kC^2U^2 = k_1U^2$  и отклонение подвижной пластины, пропорциональное действующей силе, зависит от квадрата измеряемого напряжения. Шкала такого киловольтметра квадратична.

Из высоковольтных электростатических киловольтметров распространен настольный прибор С-100, имеющий три предела измерения 25, 50, 75 кВ со входной емкостью в пределах 5..50 пФ и сопротивлением утечки порядка  $10^{15}$  Ом. Киловольтметр С-96 позволяет измерять напряжения до 30 кВ, а киловольтметр С-101, представляющий собой напольную конструкцию достаточно больших размеров, – до 300 кВ.

Измерение высокого постоянного напряжения проще всего прово-

дить с помощью *магнитоэлектрического измерительного механизма*, включенного последовательно с высоковольтным *добавочным резистором* с большим сопротивлением (рис. 11.1). Магнитоэлектрический механизм обладает самой высокой чувствительностью среди электромеханических измерительных механизмов, что позволяет ограничиться очень небольшими токами в измерительной цепи.

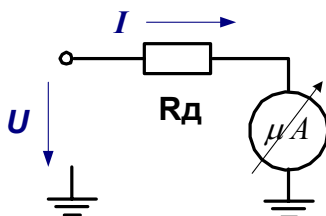


Рис. 11.1. Схема измерения высокого напряжения магнитоэлектрическим прибором с добавочным резистором

Добавочный резистор  $R_d$  рассчитан на полное измеряемое напряжение и обычно выполняется в виде цепочки последовательно соединенных резисторов с углеродистым или металлическим полупроводящим слоем. Сопротивление добавочного резистора выбирается не менее чем 1 МОм/кВ (ток менее 1 мА), чтобы обеспечить небольшое тепловыделение. Из-за возникновения токов утечки по поверхностям резисторов ограничивают сопротивление сверху, не более 10 МОм/кВ (ток 0.1 мА).

При напряжениях выше 100 кВ цепочку резисторов располагают по спирали и помещают в изоляционный цилиндр с маслом или элегазом. Масляная изоляция улучшает теплоотвод, а масло или элегаз позволяют увеличить допустимые напряжения на каждом резисторе цепочки. Величина измеряемого напряжения определяется протекающим током и сопротивлением резисторов,  $U = R_d I$ .

## 11.2. Измерение высоких переменных напряжений

*Измерительный шаровой разрядник* является универсальным измерительным прибором, пригодным и для измерения *амплитуды* переменного напряжения. Методика измерений остается такой же, как и для случая измерения высокого постоянного напряжения.

*Электростатический вольтметр* принципиально пригоден для измерения эффективного значения переменного напряжения. Сила взаимодействия пластин электростатического вольтметра  $F = kq^2$  в данном случае периодически меняется во времени, а отклонение подвижной пластины из-за ее инерционности определяется средним за период значением силы,  $\bar{F} = kC^2 \overline{u^2} = kC^2 \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt = k_1 U^2$ , то есть среднеквадратичным значением

мгновенного напряжения, которое по определению является эффективным значением напряжения.

Частотный диапазон электростатического киловольтметра ограничен только паразитными индуктивностями; так, для киловольтметра С-100 верхняя граничная частота составляет 10 МГц.

**Емкостные делители напряжения** позволяют измерять высокие переменные напряжения с помощью низковольтных вольтметров, обеспечивая точное повторение формы высокого напряжения на низковольтном выходе. Последнее требование важно в случае контроля гармонического состава переменного напряжения.

Омические делители на основе резисторов на переменном напряжении не пригодны ввиду наличия паразитных емкостей, что требует применения резисторов со сравнительно небольшим сопротивлением и большой рассеиваемой мощностью; индуктивные делители обладают нелинейностью параметров и паразитными емкостными и омическими свойствами.

Емкостный делитель имеет высоковольтное плечо С1 (рис. 11.2) и низковольтное плечо С2. Емкость высоковольтного плеча много меньше емкости низковольтного плеча, и практически все высокое напряжение приходится на высоковольтное плечо, которое часто выполняют последовательным соединением нескольких конденсаторов. Входное и выходное напряжения делителя связаны друг с другом коэффициентом деления делителя

$$K = \frac{U_{вх}}{U_{вых}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}.$$

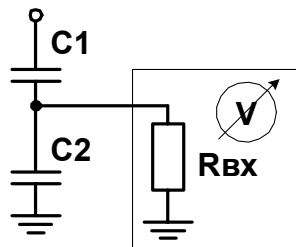


Рис. 11.2. Схема емкостного делителя

Делитель напряжения должен удовлетворять трем основным требованиям:

- выполнение изоляции делителя таким образом, чтобы отсутствовали частичные разряды, искажающие форму кривой измеряемого напряжения;
- точное совпадение форм кривых входного и выходного напряжений (на низком напряжении);
- малая нагрузка измеряемых цепей.

Первое требование приводит к тому, что высота делителя напряжения (не только емкостного, но и омического делителя) составляет обычно 2.5 м/МВ для постоянных напряжений и грозовых импульсов и около 5

м/МВ (эффективное значение) для переменного напряжения.

Искажение формы выходного напряжения (или зависимость коэффициента деления от частоты) возникает из-за ограничения частотного диапазона работы конденсаторов делителя, из-за влияния паразитных индуктивностей схемы и из-за подключения входного сопротивления вольтметра. Для снижения влияния последнего фактора необходимо соблюдать условие  $R_{\text{ex}} \gg \frac{1}{\omega C_2}$  на нижней границе частотного диапазона работы делителя.

Малая нагрузка измеряемых цепей создается при малой емкости высоковольтного плеча делителя, однако при слишком малых емкостях становится заметным влияние окружающих предметов на коэффициент деления. Практически при достаточно большой высоте делителя удельная емкость высоковольтного плеча должна быть не менее 30-50 пФ/м.

**Для измерения амплитудного значения** переменного напряжения может быть использована простая схема рис. 11.3. Микроамперметр РА магнитоэлектрического типа реагирует на среднее за период значение тока, протекающего через него в течение положительного полупериода:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{C}{T} \int_{-U_m}^{+U_m} du = \frac{2CU_m}{T} = 2f CU_m,$$

так что амплитуда напряжения равна  $U_m = \frac{1}{2fC} I_{cp}$ . Второй диод VD2 обеспечивает протекание тока в отрицательный полупериод, что предотвращает накопление заряда на конденсаторе.

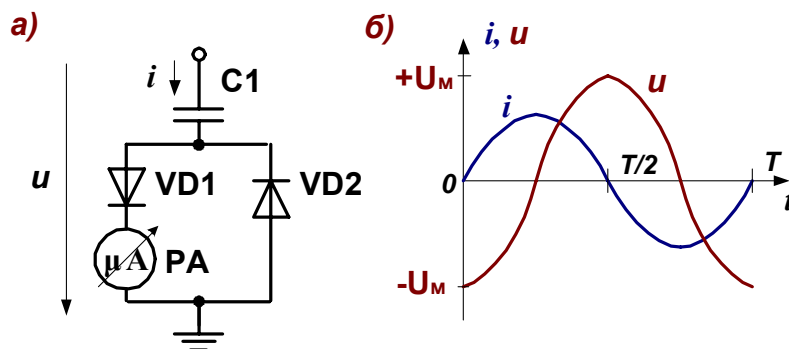


Рис. 11.3. Схема измерения амплитудного значения и кривые тока и напряжения

Эта схема пригодна только в случае, если в течение каждого полупериода напряжения имеется не более одного максимума.

В условиях эксплуатации наиболее распространенным методом измерения напряжения является применение **низковольтных вольтметров с трансформаторами напряжения**. При соблюдении условий загрузки трансформаторов напряжения этот метод обеспечивает высокую точность

измерений, однако несинусоидальность напряжения приводит к достаточно большим погрешностям. Некоторые типы трансформаторов напряжения вносят большие искажения уже в третью гармонику (например, трансформатор ЗНОМ-35), хотя есть сообщения о нормальном преобразовании частот трансформаторами напряжения вплоть до 1 кГц.

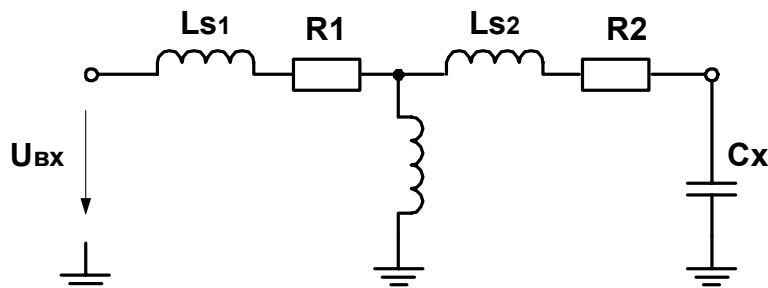


Рис. 11.4. Т-образная схема замещения трансформатора с емкостной нагрузкой

В испытательных установках переменного напряжения измерения высокого напряжения производятся путем *измерения напряжения первичной обмотки испытательного трансформатора* с пересчетом по коэффициенту трансформации. Этот метод измерения может приводить к большим погрешностям в связи с наличием индуктивности рассеяния трансформатора.

Поскольку объект испытаний представляет собой емкостную нагрузку с высокой добротностью, то вместе с индуктивностью рассеяния образуется последовательный колебательный контур (рис. 11.4). При достаточно большой емкости испытуемого объекта напряжение на нем может быть существенно выше рассчитанного по коэффициенту трансформации. Несколько меньшие погрешности получаются при подключении низковольтного вольтметра к отводу высоковольтной обмотки, однако для исключения резонансных эффектов рекомендуется измерять непосредственно высокое напряжение.

### 11.3. Измерение высоких импульсных напряжений

*Измерительный шаровой разрядник* пригоден и для измерения максимального значения напряжения стандартного грозового импульса. При измерении амплитуды импульса подбирают такое расстояние между шарами разрядника, при котором из десяти поданных импульсов пять закончатся пробоем, а оставшиеся пять – нет. Пробивное напряжение, определяемое по такому расстоянию с учетом поправки на относительную плотность воздуха (пятидесятипроцентное пробивное напряжение), соответствует амплитуде импульса с погрешностью в  $\pm 3\%$ . Разряд между шарами в этом случае происходит вблизи максимального значения напряже-

ния импульса. Сопротивление резистора, включенного последовательно с разрядником, не должно превышать 500 Ом, так как при больших его значениях возникают недопустимые погрешности измерения из-за падения напряжения за счет емкостного тока разрядника до его пробоя.

При проведении измерений расстояние между шарами изменяется ступенями, составляющими 2..5% от ожидаемого пробивного расстояния. На каждой ступени к объекту прикладывается не менее 10 импульсов с интервалами не менее 5 с. Пятидесятипроцентное напряжение определяется путем интерполяции результатов, полученных на двух или более расстояниях. С меньшей точностью можно допустить подбор расстояния, при котором происходит от четырех до шести пробоев разрядника из десяти одинаковых приложенных импульсов.

Другим способом измерения импульсных напряжений является применение *делителей напряжения с низковольтным импульсным вольтметром или осциллографом*. Делитель напряжения может быть омическим, емкостным или емкостно-омическим. Основной характеристикой делителя является коэффициент деления  $K = \frac{u_{вх}}{u_{вых}} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}$ , где  $Z_1$  и  $Z_2$  –

полные сопротивления высоковольтного и низковольтного плеч делителя. Другой важной характеристикой делителя является частотная характеристика, представляющая собой зависимость коэффициента деления от частоты.

*Омические делители напряжения* изготавливают из нихромовой или константановой проволоки, наматываемой для снижения индуктивности бифилярно (то есть двумя встречными параллельно включенными катушками) на изоляционный каркас. Применение жидкостных или объемных угольных резисторов ограничено в связи с зависимостью их сопротивлений от температуры и приложенного напряжения. С целью повышения начального напряжения короны и улучшения охлаждения резисторы помещают в изоляционные цилиндры с маслом.

Паразитные индуктивности делителя и паразитные емкости элементов делителя по отношению к заземленным частям приводят к искажению формы выходного импульса по отношению к входному напряжению, и наибольшие искажения имеют место на фронте импульса (увеличение длительности фронта). С увеличением сопротивления делителя искажения возрастают, однако сильно снижать сопротивление делителя нельзя из-за влияния делителя на параметры импульса. Типичными значениями сопротивления делителя является 10..20 кОм. Искажения можно уменьшить также с помощью экранирования омических делителей. Наиболее эффективным является применение кольцевого экрана, надвинутого на высоковольтный конец делителя.

Для снижения влияния паразитных емкостей и входных емкостей

низковольтного оборудования (которое обычно подключается с помощью экранированного кабеля) применяют *емкостно-омический делитель* напряжения (рис. 11.5). Чтобы коэффициент деления не зависел от частоты, требуется выполнение условия  $R_1C_1 = R_2C_2$ , которое может быть нарушено влиянием измерительных цепей низковольтного плеча.

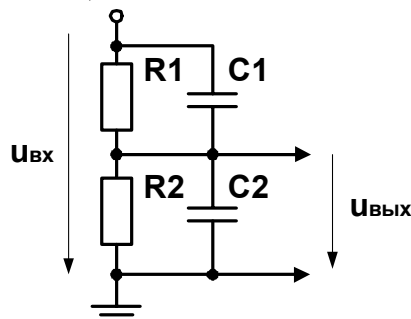


Рис. 11.5. Емкостно-омический делитель напряжения

*Емкостный делитель* напряжения практически не приводит к искажению измеряемого импульса напряжения (рис. 11.6). Чтобы избежать распространения отраженных волн в кабеле, соединяющем делитель с осциллографом, последовательно с жилой у выхода делителя включается резистор  $R_c$ , сопротивление которого равно волновому сопротивлению кабеля.

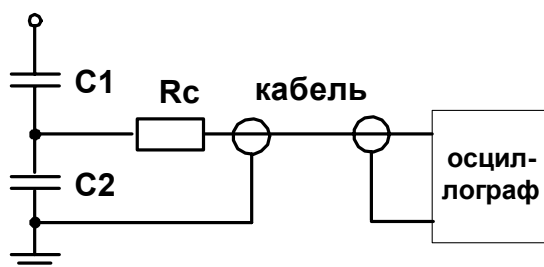


Рис. 11.6. Емкостный делитель напряжения

Схема рис. 11.6 обеспечивает согласование делителя с кабелем, если емкость кабеля много меньше емкости низковольтного плеча делителя  $C_2$ ; в противном случае требуются более сложные схемы согласования.

## РЕЗЮМЕ

Наиболее распространенными средствами измерения высоких постоянных напряжений являются шаровые разрядники, электростатические вольтметры и добавочные резисторы.

На высоком переменном напряжении для измерений применяются шаровые разрядники, электростатические вольтметры, емкостные делители напряжений, трансформаторы напряжения с низковольтными вольтмет-

рами и низковольтные вольтметры в первичных обмотках повышающих трансформаторов.

Для измерения импульсных напряжений используют шаровые разрядники и делители напряжения.

### Контрольные вопросы

1. Какие средства используют для измерения высоких постоянных напряжений?
2. Какие средства используют для измерения высоких переменных напряжений?
3. Какие средства используют для измерения высоких импульсных напряжений?
4. На чем основан принцип действия измерительного шарового разрядника?
5. Можно ли использовать трансформаторы напряжения для контроля высших гармоник переменного напряжения?

## Лекция 12. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

### 12.1. Общая характеристика перенапряжений

*Перенапряжением* называют всякое превышение напряжением амплитуды наибольшего рабочего напряжения. Длительность перенапряжения может составлять от единиц микросекунд до нескольких часов. Воздействие перенапряжения на изоляцию может привести к ее пробое.

*К основным характеристикам* перенапряжения (которые, как правило, являются случайными величинами) относят следующие:

- максимальное значение;
- кратность перенапряжения, равная отношению максимального значения перенапряжения к амплитуде наибольшего допустимого рабочего напряжения;
- время нарастания перенапряжения;
- длительность перенапряжения;
- число импульсов в перенапряжении;
- широта охвата сети;
- повторяемость перенапряжения.

Наибольшее рабочее напряжение (линейное) определяется соотношением  $U_{\text{раб.наиб.}} = k_p U_{\text{ном}}$ , где значение коэффициента  $k_p$  принимают равным следующим значениям.



Класс напряжения $U_{ном}$ , кВ	3-20	35-220	330	500-1150
$k_p$	1.2	1.15	1.10	1.05

ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» дает дополнительные определения для перенапряжения:

- **импульс напряжения** - резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд;
- **временное перенапряжение** - повышение напряжения в точке электрической сети выше  $1,1U_{ном}$  продолжительностью более 10 мс, возникающее в системах электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях;
- **коэффициент временного перенапряжения** - величина, равная отношению максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения за время существования временного перенапряжения к амплитуде номинального напряжения сети.

Для отклонения напряжения ГОСТ 13109-97 определяет нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии соответственно  $\pm 5$  и  $\pm 10\%$  от номинального напряжения электрической сети.

**По месту приложения напряжения** различают:

- фазные перенапряжения;
- междуфазные перенапряжения;
- внутрифазные перенапряжения (например, между витками катушки трансформатора, между нейтралью и землей);
- между контактами коммутационных аппаратов.

**По причинам возникновения** перенапряжения подразделяются на следующие:

- внешние – от разрядов молнии (атмосферные перенапряжения) и от воздействия внешних источников;
- внутренние – возникающие при резонансных явлениях, при авариях и при коммутациях элементов электрической цепи.

В высоковольтных цепях главным источником внешних перенапряжений являются разряды молнии. Наиболее опасны **прямые удары молнии** в оборудование (ПУМ), при которых даже на заземленных сооружениях возникают большие потенциалы. **Индуктированные перенапряжения** возникают вследствие индуктивной и емкостной связи канала молнии с токоведущими и заземленными частями электрической сети. Величина индуктированных перенапряжений меньше, чем при прямых ударах молнии, и они опасны только для сетей до 35 кВ при ударе молнии вблизи линии.

Импульсы перенапряжений распространяются на значительные расстояния от места возникновения. Набегающие волны могут представлять опасность для электрооборудования подстанций, электрическая прочность которого ниже, чем у линейной изоляции.

**Внутренние перенапряжения** по длительности и по причине возникновения делятся на квазистационарные и коммутационные.

**Квазистационарные перенапряжения** продолжаются от единиц секунд до десятков минут и в свою очередь подразделяются на режимные, резонансные, феррорезонансные и параметрические. Режимные перенапряжения возникают при несимметричных коротких замыканиях на землю, а также при разгоне генератора в случае резкого сброса нагрузки. Резонансные перенапряжения имеют место при возникновении резонансных эффектов в линиях (при одностороннем питании линии), в электрических цепях при наличии реакторов. Феррорезонансные перенапряжения возникают в цепях с катушками с насыщенным магнитопроводом, что может быть как на частоте 50 Гц, так и на высших гармониках и на субгармониках. Особенностью феррорезонанса является скачкообразный вход в режим резонанса (триггерный эффект).

**Коммутационные перенапряжения** возникают при переходных процессах и быстрых изменениях режима работы сети (при работе коммутационных аппаратов, при коротких замыканиях и при прочих резких изменениях режима) за счет энергии, запасенной в емкостных и индуктивных элементах. Наиболее часто такие перенапряжения имеют место при коммутациях линий, индуктивных элементов, конденсаторных батарей.

## 12.2. Общая характеристика защитных мероприятий

Все мероприятия по защите от перенапряжений делятся на две группы:

- превентивные меры снижения перенапряжений;
- защита оборудования с помощью коммутационных защитных средств.

**Превентивные меры** – это предотвращение возникновения перенапряжений или ограничение их величины в месте их возникновения. К таким мерам относятся следующие меры:

- применение выключателей с шунтирующими резисторами;
- применение выключателей без повторных зажиганий дуги между контактами при их разведении;
- применение грозозащитных тросов и молниеотводов;
- заземление опор линий электропередачи;
- емкостная защита изоляции обмоток трансформаторов и реакторов;
- применение емкостных элементов для снижения перенапряжений.

**Коммутационные средства** защиты от перенапряжений срабатывают и соединяют защищаемую цепь с заземлением в случае, когда перенапряжение в точке их установки превышает некоторую критическую величину. К этим средствам относят разрядники, шунтирующие реакторы с искровым соединением и нелинейные ограничители перенапряжений.

Надежность защиты в значительной степени определяется состоянием **заземления** опор воздушных линий и металлических корпусов оборудования подстанций. Заземление и вне его роли защиты от перенапряжений является весьма ответственным элементом сетей высокого напряжения. Различают три основных типа заземлений:

- **рабочее заземление**, используемое для создания необходимого распределения напряжений и токов в нормальных и аварийных режимах работы сети;
- **защитное заземление**, служащее для защиты персонала от напряжения, возникающего на корпусах оборудования при повреждениях изоляции или вследствие влияний;
- **грозозащитное заземление**, предназначенное для защиты от внешних перенапряжений.

Заземление разрядников, молниеотводов и тросов способствует уменьшению вероятности перекрытия изоляции при грозовых разрядах. Функции рабочего, защитного и грозозащитного заземлений часто возлагают на одно устройство.

Основной характеристикой заземляющего устройства является его **сопротивление**, определяемое как отношение потенциала на зажиме заземлителя к току, стекающему через заземлитель. Потенциал определяется по отношению к удаленной точке земли. Сопротивление заземлителя зависит от конструкции и размеров, удельного сопротивления земли, а также от величины и формы стекающего с него тока. Различают сопротивления на частоте 50 Гц и на грозовых импульсах, эти сопротивления могут значительно различаться. Импульсное сопротивление заземлителя определяют при протекании импульсного тока, по форме совпадающего со стандартным грозовым импульсом.

Сопротивление заземлителя на частоте 50 Гц  $R_{\sim}$  и импульсное сопротивление  $R_u$  связывают друг с другом импульсным коэффициентом заземлителя  $\alpha_u$ :  $R_u = \alpha_u \cdot R_{\sim}$ . При стекании с заземлителя больших токов вблизи металлических частей заземлителя плотность тока  $\delta$  велика, также велика напряженность электрического поля  $E = \delta \rho_3$ , где  $\rho_3$  - удельное сопротивление земли. В этой области происходит локальная ионизация грунта со снижением  $\rho_3$  в месте ионизации, что приводит к снижению импульсного сопротивления и  $\alpha_u < 1$ .

При большой протяженности заземлителя (десятки метров) при им-

пульсных токах сказывается влияние его индуктивности и может быть  $\alpha_u > 1$ . Этот эффект иллюстрируется схемой замещения заземлителя, рис. 12.1.

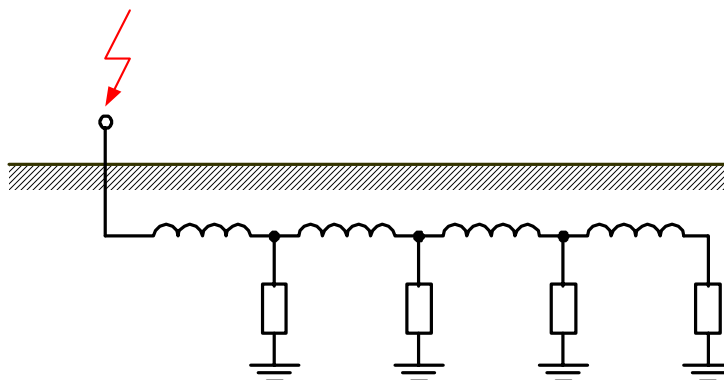


Рис. 12.1. Схема замещения протяженного заземлителя

Емкостные токи в грунте при импульсе с фронтом в несколько микросекунд при удельном сопротивлении земли менее  $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  существенно меньше токов проводимости, поэтому на схеме рис. 12.1 емкостные элементы отсутствуют. Заземлитель становится протяженным, если при времени фронта импульса  $3..5 \text{ мкс}$  длина заземлителя превышает  $10 \text{ м}$ . В этом случае на фронте импульса включается только ближняя к вводу часть заземлителя, и лишь на спаде волны тока подключаются удаленные участки заземлителя.

### 12.3. Характеристики грозовой деятельности и параметры молний

Для прогноза атмосферных перенапряжений и обоснованного выбора средств защиты необходимо иметь информацию по двум направлениям:

- о возможном количестве разрядов молнии в защищаемое оборудование или вблизи него;
- о токах в разряде молнии.

Первый вопрос решается путем анализа многолетних метеорологических наблюдений и использованием средних характеристик грозовой деятельности. Второй вопрос более сложен из-за сложности прямых измерений токов в разряде молнии, однако многочисленные исследования в этом направлении позволили получить приемлемые статистические данные по параметрам разрядов молнии.

**Молния** представляет собой электрический разряд между объемным зарядом в облаке и землей (наземные разряды) или между двумя заряженными областями (межоблачные и внутриоблачные разряды). Молнии предшествует **процесс разделения и накопления** электрических зарядов в облаках, происходящий из-за мощных восходящих воздушных потоков и

интенсивной конденсации в них водяных паров. Восходящие потоки возникают в результате нагрева приземных слоев воздуха, который становится легче более холодных слоев. В восходящем потоке воздух охлаждается, и на определенной высоте его температура достигает значения, при котором образуется насыщенный водяной пар. Конденсация сопровождается выделением тепла, что стимулирует дальнейшее продвижение воздушного потока вверх до высоты примерно 6 – 8 км с образованием мощного кучевого облака.

Различают три характерные стадии развития грозового облака:

- зарождение с разрастанием облака (10 – 15 мин);
- зрелая стадия с интенсивными осадками, сопровождаемыми холодными нисходящими потоками и резкими порывами ветра (15 – 30 мин);
- распад облака при прекращении восходящих и нисходящих потоков воздуха и постепенном выпадении осадков (около 30 мин).

В целом грозовая деятельность определяется процессами в ряде отдельных грозовых ячеек. При прохождении холодного атмосферного фронта с резким понижением температуры воздуха такие процессы могут длиться до нескольких часов.

**Первоначальным пусковым механизмом электризации** грозового облака считается наличие в атмосфере электрического поля хорошей погоды из-за заряженности конденсатора земля – ионосфера (рис.12.2) с напряженностью около 100 В/м.

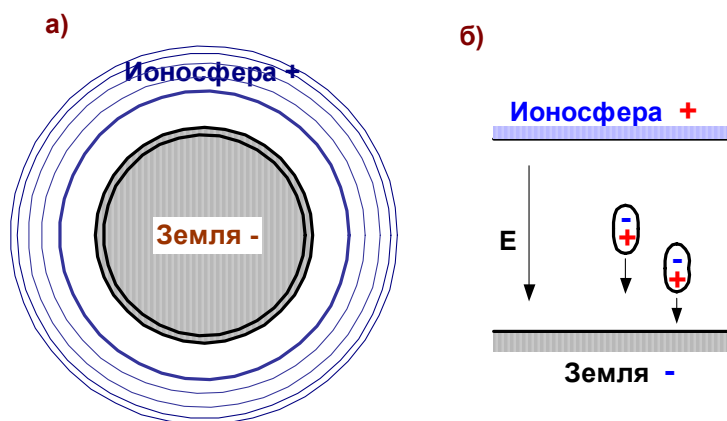


Рис. 12.2. Электрическое поле в атмосфере при хорошей погоде

Капельки воды в облаке в электрическом поле атмосферы становятся электрическими диполями, у которых положительный заряд находится внизу. Перемещающиеся вниз капельки отталкивают положительные ионы и захватывают отрицательные, приобретая избыточный отрицательный заряд; аналогично движущиеся вверх капельки становятся положительными. Движущиеся вверх капельки замерзают при температуре существенно ниже 0°C (при резком переохлаждении замерзание происходит при температуре около -18°C). Капелька при резком замерзании лопается, распадаясь

на мелкие льдинки, которые уносят положительный заряд на высоту 10 – 12 км. В итоге грозовое облако представляет собой диполь с зарядом в среднем 25 Кл. Центр отрицательного заряда расположен на высоте около 5 км над землей (рис. 12.3), и большая часть наземных молний (около 90%) переносит на землю отрицательный заряд, подзаряжая конденсатор земля – ионосфера. В средних широтах Земли разряды на землю составляют 30..40% всех молний, остальные разряды – межоблачные и внутриоблачные.

**Перед разрядом молнии** потенциал центральной части отрицательного заряда составляет 50..100 МВ и средняя напряженность поля под облаком невелика, всего 100..200 В/см, однако вблизи центра заряда напряженность поля достигает 20..24 кВ/см, что достаточно для начала ионизации. Развитие наземного разряда молнии, как правило, начинается от облака, ответвления канала при этом направлены вниз. Восходящие молнии наблюдаются только на очень высоких объектах или в горной местности.

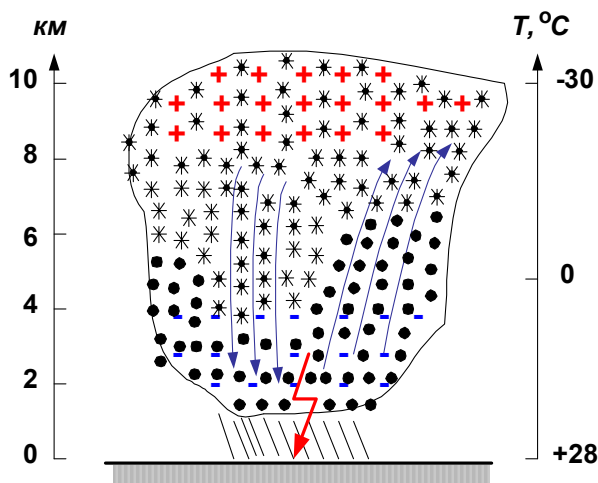


Рис. 12.3. Образование заряженных областей в грозовом облаке

Разряд молнии состоит из нескольких стадий. Вначале от центра отрицательного заряда по направлению к земле начинает скачками-ступенями развиваться канал ионизации – ступенчатый лидер. Средняя скорость продвижения ступенчатого лидера составляет 150..300 км/с. При приближении лидера к земле или к возвышенному объекту от последнего начинает развиваться встречный лидер высотой примерно 10 м или более. При соединении двух лидеров ток резко возрастает до значений в десятки и сотни килоампер, канал ионизации сильно нагревается и зона с большим током со скоростью 0.05 – 0.5 от скорости света распространяется обратно к облаку. Эта стадия называется главным разрядом или обратным ударом. Главный разряд отводит на землю заряд из канала лидера и его чехла за время от 20 до 200 мкс. Время нарастания тока в канале главного разряда составляет 5..10 мкс. Таких главных разрядов в одном ударе молнии несколько, в среднем два или три, а общая длительность удара молнии со-

ставляет десятые доли секунды ( в среднем 0.3 с). Последующие главные разряды имеют длительность фронта порядка 1 мкс. В промежутках между главными разрядами могут протекать слабо меняющиеся во времени токи величиной в сотни ампер, на которые, тем не менее, приходится основная доля перемещаемого молнией заряда.

**Степень опасности** удара молнии определяется прежде всего максимальным значением тока  $I_m$  в канале. Величина падения напряжения на индуктивных элементах и величины индуктированных перенапряжений зависят от скорости нарастания тока молнии  $a = \frac{di_m}{dt}$  на фронте волны. Это наиболее важные параметры тока; кроме того, интеграл  $\int i_m^2 dt$  определяет нагрев металлических частей, а оплавление металлических частей дугой зависит от величины перенесенного заряда. Обнаружено, что амплитуда тока главного разряда практически не зависит от сопротивления заземления в месте удара, так что молнию можно считать источником тока.

В приближенных расчетах используют усредненные распределения  $I_m$  и  $a$  без учета их различия в первом и последующем импульсах:

- $P(I_m) = e^{-0.04I_m}$  - вероятность того, что амплитуда тока в ударе молнии превысит заданное значение  $I_m$  в килоамперах (этот подход практически удобнее, чем обычное определение вероятности как доли всех реализаций при значениях случайной величины, меньших заданной);
- $P(a) = e^{-0.08a}$  - вероятность превышения крутизной тока заданного значения  $a$ , кА/мкс.

Между амплитудой и крутизной тока существует слабая положительная связь, однако при расчетах их обычно полагают статистически независимыми случайными величинами. В горных районах при тех же вероятностях величины  $I_m$  и  $a$  примерно вдвое меньше.

Для прогноза количества ударов молнии в защищаемый объект используют метеорологическую характеристику интенсивности грозовой деятельности – число часов с грозой в год в данной местности  $T_G$  – и среднее число ударов молнии в 1 км<sup>2</sup> поверхности земли за 100 грозочасов, равное  $N_1 = 6.7 \frac{1}{100ч * км^2}$ . В Иркутске  $T_G=30$  ч; с увеличением географической широты места  $T_G$  уменьшается.

Возвышенные объекты стягивают на себя удары молний с площади большей, чем их собственная площадь. Число прямых ударов в здания высотой  $H$  или в открытые распределительные устройства с молниеотводами высотой  $H$  в течение года вычисляется с увеличением горизонтальных размеров объекта  $A$  и  $B$  (в метрах) на  $3.5H$  во все стороны:

$$N_{пзм} = N_1 \frac{T_G}{100} (A + 7H)(B + 7H) \cdot 10^{-6},$$

сомножитель  $10^{-6}$  производит перевод квадратных метров в квадратные ки-

лометры для согласования с размерностью  $N_1$ .

Для линий электропередачи используют удельный показатель  $N^*_{ПУМ}$ , равный числу прямых ударов молнии на 100 км длины за 100 грозочасов. Считается, что линия собирает разряды с расстояния  $3h_{cp}$  в обе стороны:

$$N^*_{ПУМ} = 6.7 \frac{1}{\text{км}^2} * 100 \text{ км} * 6h_{cp} * 10^{-3} \approx 4h_{cp}.$$

Средняя высота подвеса провода  $h_{cp}$ , м, определяется через высоту подвеса троса или верхнего провода на опоре  $h_{он}$ , м, и стрелу провеса провода  $f$ , м, следующим образом:

$$h_{cp} = h_{он} - \frac{2}{3} f.$$

Если линия имеет длину  $l$ , км, и расположена в местности с числом грозочасов в год  $T_G$ , то ожидаемое число прямых ударов молнии в линию за год  $N_{ПУМ}$  можно оценить по следующей формуле:

$$N_{ПУМ} = N^*_{ПУМ} \frac{l}{100} \frac{T_G}{100}.$$

### **РЕЗЮМЕ**

На изоляцию электрооборудования воздействуют перенапряжения, появляющиеся в результате коммутационных процессов в сети, незапланированного режима сети или из-за разрядов молнии. Эти перенапряжения могут привести к повреждению изоляции.

В соответствии с причинами возникновения различают коммутационные, квазистационарные и атмосферные (грозовые) перенапряжения.

Очень существенную роль в защите от перенапряжений играют заземления, поведение которых при грозовых перенапряжениях характеризуется величиной импульсного сопротивления.

Источником грозовых перенапряжений служат разряды молнии, характеризующиеся числом часов с грозой в году, количеством разрядов молнии на  $1 \text{ км}^2$  за 100 грозовых часов и статистическими характеристиками тока в канале молнии и крутизны тока в канале молнии.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называют перенапряжением?
2. Приведите классификацию перенапряжений.
3. Какие существуют средства для защиты от перенапряжений?
4. Дайте определение понятий «сопротивление заземлителя», «импульсное сопротивление заземлителя», «коэффициент импульса».
5. Каковы характеристики грозовой деятельности и разрядов молнии, используемые при разработке защитных мероприятий?



## Лекция 13. АТМОСФЕРНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

### 13.1. Перенапряжения прямого удара молнии

Из всех объектов системы электроснабжения наиболее подвержены прямым ударам молнии линии электропередачи – в том числе и контактная сеть железной дороги. За грозовой сезон наблюдается несколько десятков прямых ударов молнии на каждые 100 км длины.

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

- удар молнии в провод с последующим перекрытием с провода на опору или между проводами;
- удар молнии в вершину опоры с последующим перекрытием с опоры на провод;
- удар молнии в пролет троса с последующим перекрытием с троса на провод или на землю.

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

**Вероятность попадания молнии в опору или в трос** вблизи опоры может быть приближенно оценена по соотношению  $P_{on} = \frac{4h_o}{l_{np}}$ , где  $h_o$  – высота опоры,  $l_{np}$  – длина пролета; если вычисленное значение больше единицы, то его принимают равным единице.

Для контактной сети с ее малыми расстояниями между опорами это означает, что большая часть прямых ударов будет приходиться на опоры контактной сети. На заземлении опоры (на рельсе) при этом возникает напряжение, определяемое падением напряжения на индуктивности снижения и на активном сопротивлении заземления  $u = i_m R + L \frac{di_m}{dt}$ . Небольшое напряжение перекрытия контактной сети (порядка 300 кВ для контактной

сети переменного тока) приводит к перекрытию изоляции практически при каждом прямом ударе молнии. Около половины перекрытий переходят в дуговой разряд с отключением фидера контактной сети.

Для линий более высокого напряжения не каждый прямой удар молнии в опору или в грозозащитный трос приводит к перекрытию изоляции. Под **уровнем грозоупорности** линии понимают наибольший расчетный ток молнии, при котором еще не перекрывается изоляция линии. На возможность перекрытия изоляции влияет и крутизна тока в канале молнии. В качестве **показателя надежности грозозащиты** используют среднее число отключений линии в год или обратную величину – среднее число лет безаварийной работы.

### 13.2. Индуцированные перенапряжения

При ударах молнии вблизи воздушной линии на фазных проводах возникают индуцированные напряжения, которые имеют электрическую и магнитную составляющие,  $U_{инд} = U_{из} + U_{им}$ .

Отрицательный заряд канала лидера молнии вызывает появление на проводе положительного заряда (рис. 13.1). При сравнительно медленном продвижении лидера потенциал провода остается равным нулю, поскольку электрическое поле заряда провода уравнивает электрическое поле заряда лидера. В стадии главного разряда, когда канал лидера очень быстро нейтрализуется, заряды на проводе освобождаются и создают волны напряжения, распространяющиеся в обе стороны линии. Это и есть электрическая составляющая индуцированного напряжения, которая прямо пропорциональна средней высоте подвеса провода  $h_{ср}$  и обратно пропорциональна кратчайшему расстоянию до точки удара молнии  $b$ ,  $U_{из} = k_э \frac{h_{ср}}{b} I_m$ .

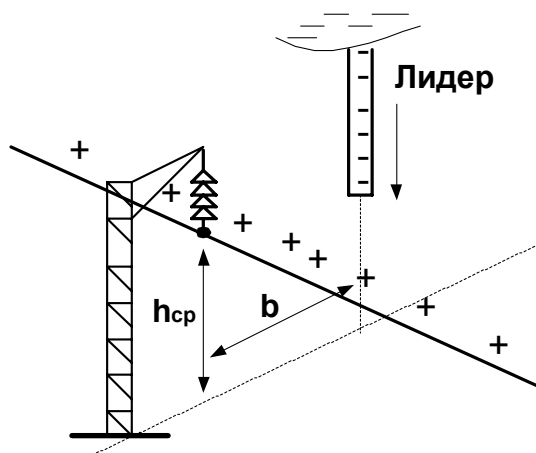


Рис. 13.1. Схема появления индуцированного перенапряжения

Изменение магнитного поля главного разряда наводит в контуре опора – провод – ближняя опора – земля ЭДС, вызывающую магнитную составляющую индуктированного напряжения. Максимальное значение напряжения так же зависит от высоты провода и расстояния, как и для электрической составляющей,  $U_{им} = k_m \frac{h_{cp}}{b} I_m$ , так что индуктированное напряжение равно  $U_{инд} = (k_s + k_m) \frac{h_{cp}}{b} I_m \approx 30 \frac{h_{cp}}{b} I_m$ , где  $k_s + k_m \approx 30 \text{ Ом}$ .

### 13.3. Грозопоражаемость контактной сети

Чтобы оценить среднее число перекрытий изоляции контактной сети за год, необходимо учесть прямые удары молнии и индуктированные перенапряжения. Оценка количества прямых ударов молнии в контактную сеть, каждый из которых приведет к перекрытию изоляции, может быть сделана по формулам раздела 12.3. Средняя высота опоры около 10 м такова, что можно не учитывать количество путей участка, поскольку при этом к  $6h_{cp}=60$  м нужно прибавить еще 5-7 м, что при оценочных расчетах особого смысла не имеет. Для индуктированных перенапряжений необходимо выбрать все удары молнии, которые могут происходить на расстоянии более  $3h_{cp}$ , выделив из них те удары, которые приведут к перенапряжениям, превышающим напряжение перекрытия изоляции контактной сети. В этом разделе произведена оценка числа перекрытий изоляции 100 км контактной сети из-за прямых ударов молнии и индуктированных перенапряжений в условиях Иркутска, где  $T_T=30$  ч.

Число прямых ударов молнии в контактную сеть длиной 100 км за 100 грозочасов равно  $N^*_{пум} = 4h_{cp} = 40$ , а при 30 грозочасах  $N_{пум} = N^*_{пум} \frac{l}{100} \frac{T_T}{100} = 40 \frac{100}{100} \frac{30}{100} = 12$ . Это в среднем, а на открытых участках дороги с высокими насыпями ожидаемое число ударов молнии будет больше.

Количество индуктированных перенапряжений значительно больше, однако только наиболее близкие удары с большими токами приведут к напряжениям, превышающим напряжение перекрытия изоляции. Рассмотрим полосу земли длиной 100 км, шириной  $db$  (м) на расстоянии  $b$  (м) от оси дороги. Общее число ударов молнии в год в эту полосу равно, в соответствии с данными раздела 12.3,

$$dN_0 = 6.7 \cdot \frac{T_T}{100} \cdot 100 \cdot db \cdot 10^{-3},$$

где сомножитель  $10^{-3}$  нужен для перевода размерности  $db$  в километры.

Величина индуктированного напряжения  $U_{инд} = 30 \frac{h_{cp}}{b} I_m$  превысит напряже-

ние перекрытия изоляции, если будет соблюдено условие  $I_m \geq \frac{b}{30h_{cp}} U_{nep}$ .

Доля молний, в которых значение тока будет больше  $I_m$ , определяется выражением  $P(I_m) = e^{-0.04I_m} = \exp(-\frac{b}{750h_{cp}} U_{nep})$ , так что число ударов молнии в полосу земли с токами более заданного  $I_m$  будет равно

$$dN = P(I_m) \cdot dN_0, \quad N = 2 \int_{3h_{cp}}^{\infty} 6.7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\Gamma} \cdot \exp(-\frac{b}{750h_{cp}} U_{nep}) db, \text{ или}$$

$$N = 80.5 \cdot \frac{T_{\Gamma}}{U_{nep}} \cdot \exp(-\frac{U_{nep}}{250}), \text{ где } U_{nep} \text{ выражено в киловольтах.}$$

Если  $T_{\Gamma} = 30 \text{ час}$ ,  $U_{nep} = 300 \text{ кВ}$ , то  $N=3$ . Количество перекрытий из-за индуктированных напряжений получается существенно меньше числа перекрытий из-за прямых ударов молнии, а общее число грозových перекрытий изоляции равно 15 на 100 км контактной сети в грозовой сезон (в основном это летние месяцы). Примерно половина этих перекрытий приводит к появлению дуги короткого замыкания и отключению контактной сети.

В учебном пособии [1] для линий электропередачи приводится аналогичное выражение для числа перекрытий индуктированными перенапряжениями:

$$N = \frac{9.36 T_{\Gamma} h_{cp}}{U_{nep}} \cdot \exp(-\frac{U_{nep}}{260}).$$

Это выражение показывает, что уже для линий напряжением 110 кВ добавка перекрытий из-за индуктированных перенапряжений мала. Для линий напряжением 220 кВ и выше индуктированные перенапряжения практически не представляют опасности.

## **РЕЗЮМЕ**

Прямые удары молний приводят к перекрытию изоляции линий напряжением 3..35 кВ, в том числе и контактной сети железной дороги. Около половины всех перекрытий контактной сети переменного тока сопровождаются возникновением электрической дуги и отключением фидера.

Величина индуктированного перенапряжения примерно пропорциональна амплитуде тока молнии.

Прямые удары молнии в контактную сеть переменного тока вместе с индуктированными перенапряжениями при 30 грозových часах в году приводят в среднем к 15 перекрытиям изоляции 100 км контактной сети переменного тока.

## Контрольные вопросы

1. Какие показатели используются для количественной оценки грозоупорности?
2. Как можно оценить величину возникающего перенапряжения при прямом ударе молнии в объект?
3. Как можно оценить величину индуктированного перенапряжения?
4. Как оценивается среднее количество перекрытий изоляции грозowymi перенапряжениями?

## Лекция 14. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

### 14.1. Распространение волн перенапряжений вдоль проводов

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

Наиболее распространенным механизмом для анализа процессов в электрических цепях и предсказания их поведения являются законы Кирхгофа в совокупности с законом Ома и производные от них методы (контурных токов, узловых потенциалов, узловых напряжений и другие). К сожалению, все эти методы не учитывают запаздывание распространения электромагнитного поля и годятся только для электрически коротких цепей. Кроме того, все элементы электрической цепи рассматриваются квантованно, то есть распределенность элементов никак не учитывается, что не позволяет говорить о распределении потенциала по элементу даже в случае электрически малой его длины.

Максимальная скорость распространения электромагнитного поля в пространстве составляет 300 м/мкс. Цепь будет электрически короткой, если время распространения поля вдоль нее много меньше времени существенного изменения напряжения или тока в цепи; считается, что для синусоидальных напряжений и токов можно говорить о небольшой длине линии, если время распространения поля вдоль нее не превышает одной десятой периода напряжения. Для двухпроводной воздушной линии с расстоянием между проводами 3 м, высоте расположения проводов над землей 30 м и длине линии 30 км время распространения поля между проводами составит 0.01 мкс, между проводами и землей - 0.1 мкс, вдоль линии -

100 мкс, так что для электромагнитных процессов между проводами можно говорить о малых расстояниях между проводами до частот 10 МГц, между проводами и землей - до 1 МГц, а вдоль проводов - до частот не более 1 кГц, что соответствует частотам высших гармоник электроэнергетических систем. Именно до таких частот можно предсказывать поведение двухпроводной системы с помощью законов Кирхгофа и производных от них методов; далее нужно использовать что-нибудь другое.

Для простейшего анализа процессов можно рассматривать один провод над поверхностью хорошо проводящей плоской земли, поскольку основную опасность для оборудования представляет перенапряжение на изоляции по отношению к земле (рис. 14.1).

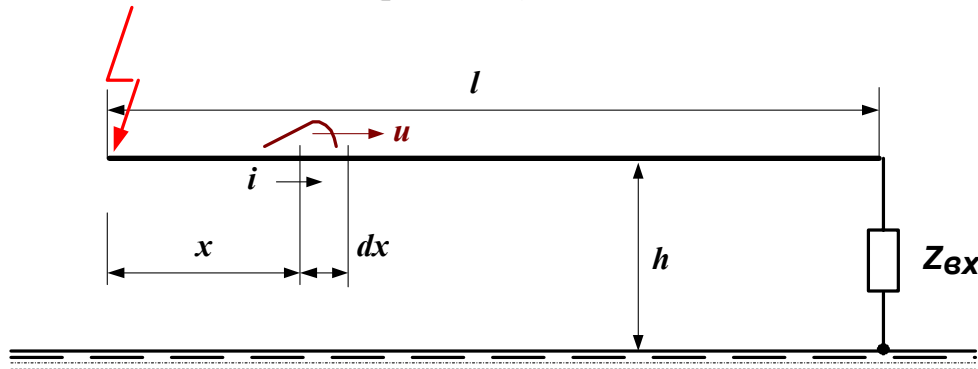


Рис. 14.1. Распространение волны перенапряжения по проводу линии

Если на некотором расстоянии  $x$  от начала линии выделить электрически короткий участок  $dx$ , то можно обойти трудность, связанную с невозможностью применения законов Кирхгофа к длинной линии; на малой длине  $dx$  при малости высоты  $h$  законы Кирхгофа вполне применимы. Схема замещения участка  $dx$  показана на рис. 14.2а, где элемент  $dR$  отражает потери энергии в проводе на нагрев,  $dL$  отображает индуктивность провода, емкостный элемент  $dC$  отображает запас энергии в электрическом поле между проводами, а проводимость  $dG$  соответствует утечке по изоляции между проводами.

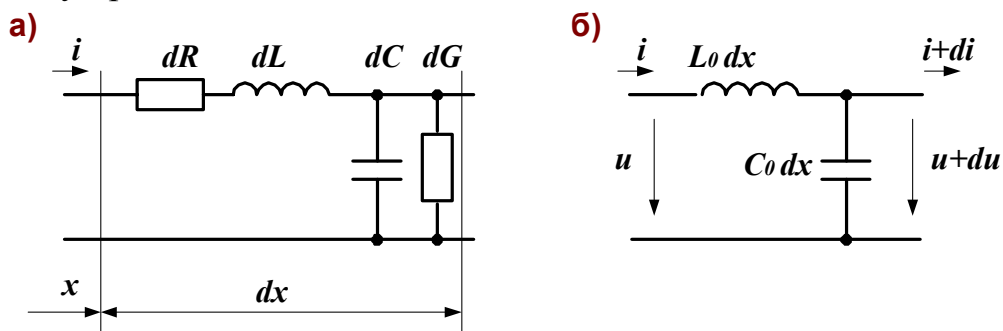


Рис. 14.2. Схема замещения участка линии длиной  $dx$

В простейшей постановке резистивными элементами можно пренебречь, считая провода низкоомными, а изоляцию идеальной (рис. 14.2б).

Ток  $i$  и напряжение  $u$  являются функциями координаты и времени,  $i = i(x, t)$ ,  $u = u(x, t)$ , и при приросте переменной  $x$  на малую величину  $dx$  они прирастают на малые величины  $di$  и  $du$ . Можно считать, что параметры схемы замещения пропорциональны длине  $dx$ , то есть

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

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

Уравнения по законам Кирхгофа для малого участка  $dx$  по рис. 14.26 выглядят следующим образом:

$$u = L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + u + du, \quad i = C_0 dx \frac{\partial u}{\partial t} + i + di,$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u_n}{\partial t} + C_0 \frac{\partial u_o}{\partial t}.$$

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

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} = -v \frac{\partial u_n}{\partial x}, \quad \frac{\partial u_o}{\partial t} = v \frac{\partial u_o}{\partial x},$$

то

$$\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 v \frac{\partial u_n}{\partial x} - C_0 v \frac{\partial u_o}{\partial x} = \frac{\partial i_n}{\partial x} + \frac{\partial i_o}{\partial x}.$$

При равенстве производных равны и первообразные с точностью до произвольной функции времени, не зависящей от координаты  $x$ , что физически возможно только для постоянного тока (иначе придется говорить о бесконечно быстром распространении воздействия по линии). Не принимая во внимание постоянные токи, получим  $i = \frac{1}{Z_B} u_n - \frac{1}{Z_B} u_o = i_n + i_o$ , где

величина  $Z_B = \frac{1}{C_0 v} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ , связывающая друг с другом падающие и отраженные волны тока и напряжения, называется **волновым сопротивлением** линии. Если отраженных волн нет, то  $u = u_n(x - vt)$ ,  $i = i_n(x - vt)$  и



$$i = \frac{u}{Z_B}$$

Двухпроводная контактная подвеска с гирляндами тарельчатых изоляторов имеет значения параметров  $L_0=1,2$  мГн/км,  $C_0=0,014$  мкФ/км, так что волновое сопротивление  $Z_B=300$  Ом, а скорость распространения волны  $v=240..270$  м/мкс, несколько меньше скорости света из-за конечной проводимости земли. При подключении усиливающего провода  $L_0=0,8$  мГн/км,  $Z_B=225$  Ом.

Силовые кабели имеют значительную емкость и малую индуктивность линии, и для них  $Z_B=5..30$  Ом,  $v=150..200$  м/мкс.

## 14.2. Перенапряжения на оборудовании, подключенном к линии

Решение телеграфных уравнений линии показывает, что перенапряжение составлено падающей и отраженной волнами напряжения. Отраженная волна возникает в конце линии при отражении волны от нагрузки линии. Характер отражения волны напряжения и получающееся итоговое напряжение на нагрузке линии зависит от характера этой нагрузки. В этом разделе рассмотрены простейшие ситуации падения волны на активную нагрузку, на емкостную нагрузку и на индуктивную нагрузку линии.

В любом случае напряжение и ток в линии – и в конце ее на нагрузке в том числе – определяется наложением падающих и отраженных волн, связанных в напряжении и токе волновым сопротивлением линии:

$$u = u_n + u_o, \quad i = i_n + i_o, \quad i_n = \frac{u_n}{Z_B}, \quad i_o = -\frac{u_o}{Z_B},$$

или для нагрузки линии

$$u_n = u_n + u_o, \quad i_n Z_B = u_n - u_o$$

что при суммировании этих уравнений дает  $u_n + i_n Z_B = 2u_n$ . Последнее уравнение соответствует электрической схеме с источником ЭДС величиной  $2u_n$  и последовательно включенными элементами  $Z_B$  и нагрузки линии (рис. 14.3а).

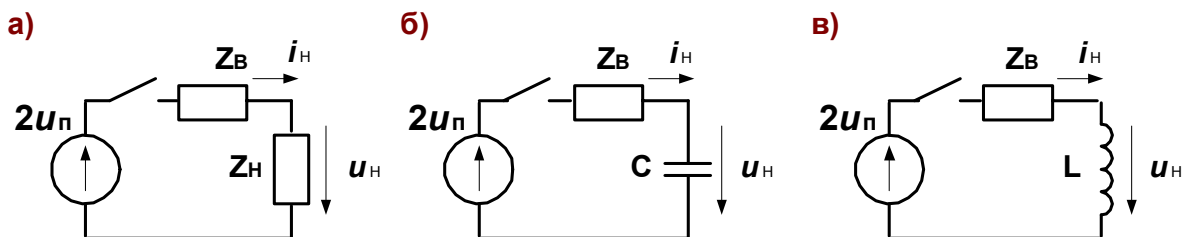


Рис. 14.3. Схема замещения линии при падении волны напряжения на нагрузку

При падении волны грозового перенапряжения на **резистивную нагрузку**  $R_n$  выполняется соотношение  $u_n = i_n R_n$ , или

$$2u_n = u_n + u_n \frac{Z_B}{R_n}, \quad u_n = \frac{2u_n}{1 + \frac{Z_B}{R_n}},$$

то есть напряжение на нагрузке может быть в пределах от  $2u_n$  до нуля. Форма напряжения на нагрузке повторяет форму падающей волны, а наибольшее напряжение получается при отсутствии нагрузки в конце линии или при большом входном сопротивлении нагрузки.

В случае **емкостной нагрузки линии** (рис. 14.3б) достаточно простые уравнения получаются только для прямоугольной волны напряжения, что эквивалентно включению схемы под постоянное напряжение величиной  $U = 2u_n$ . Задача расчета напряжения на конденсаторе при его зарядке от источника постоянного напряжения через резистор является простейшей задачей анализа переходных процессов; ток через конденсатор и напряжение на нем равны

$$i = \frac{U}{Z_B} \exp\left(-\frac{t}{Z_B C}\right); \quad u_n = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = U \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{Z_B C}\right)\right].$$

Характерное значение входной емкости оборудования  $C=1000$  пФ, если  $Z_B=300$  Ом, то  $Z_B C=0.3$  мкс, это означает зарядку емкости оборудования за время менее 1 мкс. Таким образом, при воздействии на оборудование падающей волны грозового перенапряжения с фронтом порядка 1 мкс или более емкость оборудования в 1000 пФ почти не влияет на время нарастания напряжения и на оборудование действует удвоенная волна грозового перенапряжения. Если же входная емкость оборудования велика, порядка 1 мкФ и более (кабельные вставки и конденсаторы), то  $Z_B C=300$  мкс, и будет происходить существенное снижение перенапряжения.

Анализ воздействия волны перенапряжения на **индуктивную нагрузку** (рис. 14.3в) также проще сделать для прямоугольной падающей волны. В этом случае, как известно, ток через катушку определяется формулой

$$i = \frac{2u_n}{Z_B} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right], \quad \text{где } \tau = \frac{L}{Z_B} \text{ - постоянная времени цепи. На-}$$

пряжение на нагрузке равно  $u = L \frac{di}{dt} = 2u_n \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ , что означает спад на-

пряжения на нагрузке через некоторое время, определяемое постоянной  $\tau$ . Если это время велико по сравнению с длительностью падающей волны, то это равнозначно отсутствию нагрузки линии. При  $L=0.1$  Гн (у силового трансформатора при заземлении нейтрали индуктивность катушки значительно больше) и  $Z_B=300$  Ом  $\tau=0.3$  мс, падающая волна грозового напря-

жения с длительностью в десятки микросекунд будет удваиваться на такой нагрузке.

Таким образом, отсутствие нагрузки линии, небольшая емкостная нагрузка линии или большая индуктивная нагрузка приводят к удвоению падающей волны грозового перенапряжения на конце линии.

### 14.3. Импульсные процессы в обмотках трансформаторов

Процесс падения волны перенапряжения с линии на обмотку трансформатора выглядит значительно сложнее, чем это описано в предыдущем разделе, поскольку катушка трансформатора не может быть представлена индуктивным элементом на схеме замещения. Наблюдаемые в эксплуатации повреждения изоляции (в частности, повреждения витковой изоляции вблизи линейного ввода) могут быть объяснены на основе анализа процессов в обмотках трансформаторов как в длинных линиях в соответствии со схемой замещения рис. 14.4.

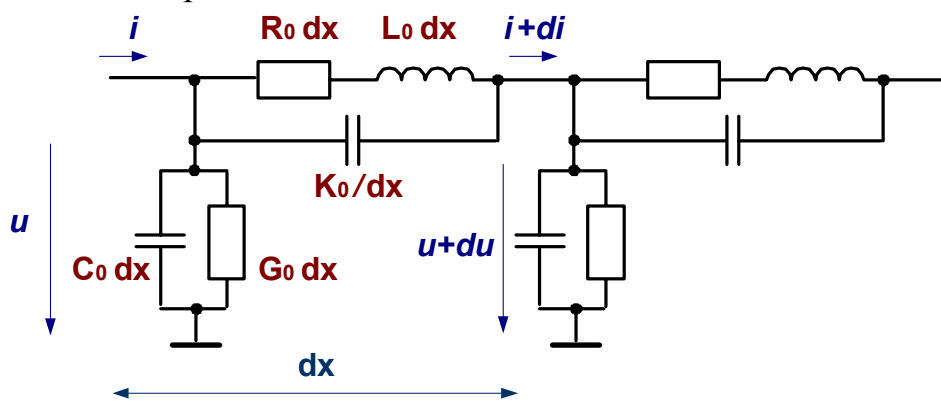


Рис. 14.4. Схема замещения обмотки трансформатора

В этой схеме  $K_0$  – емкость между соседними витками на единицу длины,  $\Phi^* \cdot m$ ,  $C_0$  – емкость между витками и сердечником на единицу длины,  $\Phi/m$ . Волновое сопротивление такой линии в несколько раз больше, чем для воздушной линии, поэтому выводы предыдущего раздела об удвоении падающей волны на обмотке трансформатора остаются верными. Рассмотрение волнового процесса будет проведено для простейшего случая *прямоугольной волны напряжения* с амплитудой  $U_0 = 2u_n$ .

**В начальный момент времени** (но после удвоения напряжения падающей волны на входе обмотки, которое происходит очень быстро, за время порядка 0.1 мкс) можно рассмотреть упрощенную схему замещения рис. 14.5, в которой на месте индуктивных элементов в соответствии с законами коммутации имеются разрывы, а все распределение напряжения определяется емкостными элементами.

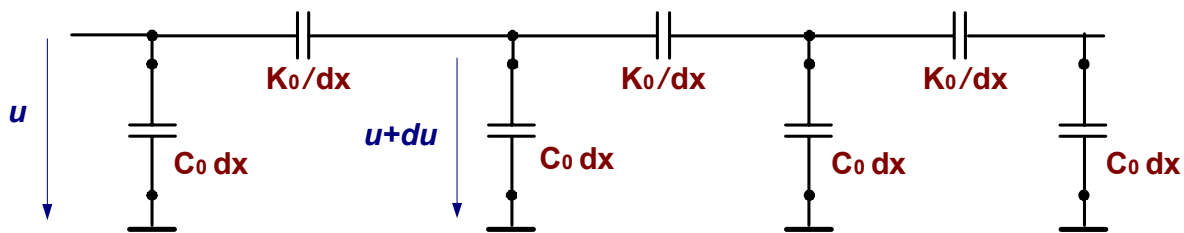


Рис. 14.5. Схема замещения для начального момента времени

Схема замещения рис. 14.5 для случаев изолированной нейтрали или заземленной нейтрали различается только небольшим емкостным элементом в конце цепочечной схемы, который закорочен в случае заземленной нейтрали, или на котором есть напряжение при изолированной нейтрали. Ввиду малой длины этого элемента  $dx$  его влияние на распределение напряжения в оставшейся части схемы ничтожно, поэтому распределение напряжения по обмотке для разных случаев состояния нейтрали различается только наличием небольшого напряжения на изолированной нейтрали.

Распределение напряжения на цепочечной схеме рис. 14.5 нелинейно, поскольку при переходе от начала схемы к концу растет величина входной емкости оставшейся части схемы и уменьшается коэффициент деления емкостного делителя в текущей точке. Анализ переходного процесса включения схемы рис. 14.5 под постоянное напряжение  $U_0$  приводит к следующим выражениям для напряжения по отношению к корпусу (баку), то есть для напряжения на главной изоляции трансформатора:

$$u(x) |_{t=0} = u(x,0) = U_0 \frac{\text{sh} \alpha(l-x)}{\text{sh} \alpha l} \quad \text{для заземленной нейтрали,}$$

$$u(x,0) = U_0 \frac{\text{ch} \alpha(l-x)}{\text{ch} \alpha l} \quad \text{для изолированной нейтрали, } \alpha = \sqrt{\frac{C_0}{K_0}}.$$

Если  $\alpha l \ll 1$ , то распределение равномерное, чем больше  $\alpha$ , тем неравномернее распределение. **Напряжение на витковой изоляции** определяется производной  $\frac{\partial u}{\partial x}$ , и максимум этой производной расположен у начала обмотки:

$$\frac{\partial u(x,0)}{\partial x} = -U_0 \frac{\alpha \text{ch} \alpha(l-x)}{\text{sh} \alpha l}, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = -U_0 \alpha \text{cth} \alpha l \quad \text{для заземленной}$$

нейтрали,

$$\frac{\partial u(x,0)}{\partial x} = -U_0 \frac{\alpha \text{sh} \alpha(l-x)}{\text{ch} \alpha l}, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = -U_0 \alpha \text{th} \alpha l \quad \text{для изолированной}$$

нейтрали.

**Окончание переходного процесса** включения цепочки рис. 14.4 под

постоянное напряжение определяется резистивными элементами, индуктивные элементы при этом представляют собой просто закоротки. При заземленной нейтрали это приводит к линейному снижению напряжения при переходе к концу обмотки; при изолированной нейтрали напряжение на всей обмотке одно и то же (рис. 14.6).

Аккуратный анализ процесса *для промежуточных моментов* времени показывает, что происходят колебания напряжения на главной изоляции обмотки, причем максимум напряжения может достигать примерно  $2U_0$ , и этот максимум лежит недалеко от ввода для заземленной нейтрали или на конце обмотки при изолированной нейтрали. Максимум напряжения на витковой изоляции по-прежнему сохраняется на первых витках вблизи линейного ввода трансформатора. Перенапряжения на витковой и главной изоляции заметно снижаются при снижении крутизны фронта импульса перенапряжения.

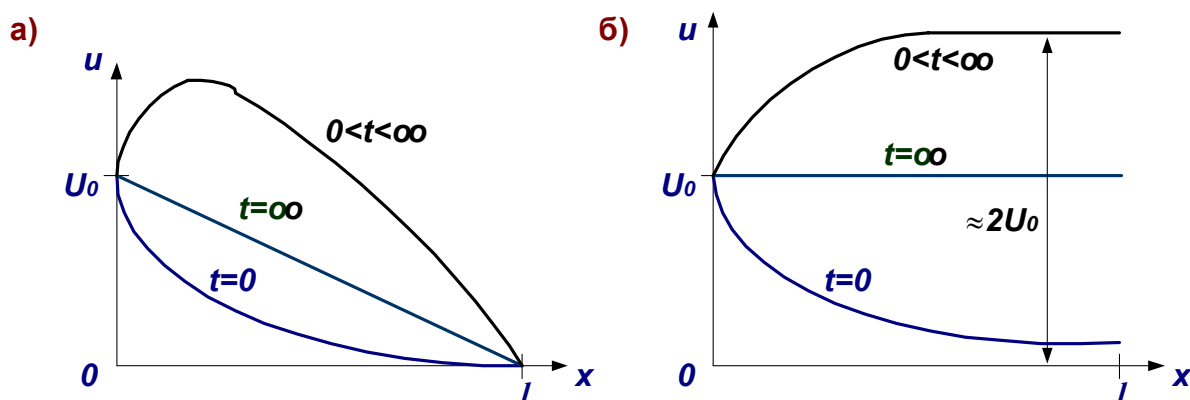


Рис. 14.6. Распределение напряжения на главной изоляции при заземленной нейтрали (а) и на изолированной нейтрали (б)

Усиление изоляции первых витков путем увеличения толщины витковой изоляции приводит к снижению продольной емкости  $K_0$  с увеличением напряжения на этих витках. С целью усиления витковой изоляции применяют емкостное выравнивание потенциалов между витками начала обмотки с помощью экранов – проводящих незамкнутых колец, соединенных с первым витком, что увеличивает емкость  $K_0$  для первых витков и снижает витковое напряжение.

### РЕЗЮМЕ

К длинным линиям относят электрические цепи, в которых необходимо учитывать запаздывание в распространении электромагнитного поля. К цепям с распределенными параметрами относят цепи, в которых необходимо заниматься распределением напряжений и токов внутри отдельных

элементов цепи.

Прямое применение законов Кирхгофа для анализа процессов в длинных линиях невозможно из-за того, что в них не учитывается запаздывание в распространении электромагнитного поля. Применение законов Кирхгофа к коротким отрезкам длинных линий приводит к дифференциальным уравнениям, называемым телеграфными уравнениями.

В длинной линии распространяются падающие и отраженные волны напряжений. Грозовые перенапряжения полностью относятся к таким типам волн.

На конце линии возможно удвоение падающей волны напряжения, а в обмотках трансформаторов на главной изоляции также возможны условия удвоения перенапряжений. Импульсные перенапряжения больше по величине на витках, расположенных вблизи проходного изолятора, с которого приходит волна перенапряжения.

### Контрольные вопросы

1. Что означают понятия «длинная линия», «цепь с распределенными параметрами»?
2. Выведите телеграфные уравнения двухпроводной линии и покажите их решение для линии без потерь.
3. Покажите, как происходит падение волны перенапряжения на резистивную, емкостную и индуктивную нагрузку.
4. Представьте анализ процессов, происходящих в обмотке трансформатора при воздействии волны грозового перенапряжения.

## Лекция 15. КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ И КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

### 15.1. Емкостный эффект линий электропередачи

Линия электропередачи обладает индуктивными и емкостными свойствами, что обуславливает возможность *резонансных эффектов*. В наиболее простой форме это отображается П-образной схемой замещения рис. 15.1, которая аналогична схеме раздела 14.1 при пренебрежении утечкой по изоляции и пригодна для коротких отрезков линии. Считается, что линия является электрически короткой, если ее длина не превышает одной десятой длины волны электромагнитного поля; для 50 Гц в воздухе длина волны составляет 6000 км. Чтобы погрешности представления линии схемой рис. 15.1 не превышали 3%, нужно еще более жесткое ограничение длины линии – не более одной двадцатой длины волны, то есть не более

300 км.

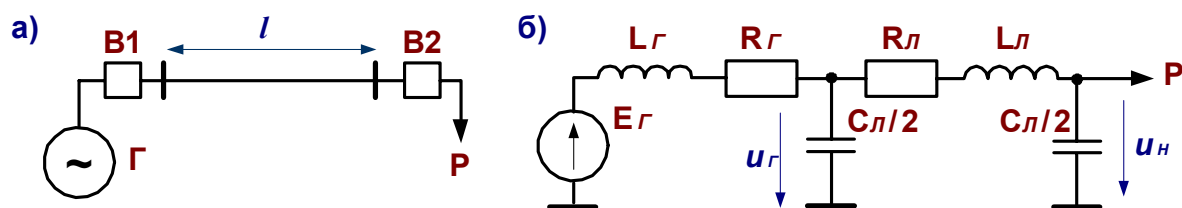


Рис. 15.1. Однолинейная схема ЛЭП (а) и П-образная схема замещения (б)

**Одностороннее питание** линии возникает практически всегда в процессе каждого ее включения и отключения из-за несовпадения моментов коммутации выключателей на разных концах линии. Резонанс в схеме рис. 15.1б наступает при длине линии 1500 км и отсутствии нагрузки, если внутреннее сопротивление генератора мало. При малой мощности генератора (большая индуктивность  $L_G$ ) резонанс наступает при меньшей длине линии. **Корона** на проводах линии увеличивает емкость проводов и также приводит к резонансу на меньших длинах. При резонансе увеличение напряжения на конце линии может в несколько раз превысить номинальное напряжение. Если длина линии сравнительно мала, то наблюдается небольшое повышение напряжения на конце линии, зависящее от длины и параметров линии.

**Подключение к линии трансформаторов** снижает емкостный эффект линии в основном за счет насыщения стали трансформатора при повышенном напряжении; снижение за счет тока холостого хода при номинальном режиме обычно невелико.

**Уменьшение длины** участков линий уменьшает перенапряжения емкостного эффекта. При больших длинах участков линии (более 300 км) и малой мощности связываемых систем на линии устанавливают **шунтирующие реакторы**, компенсирующие емкостный ток линии.

## 15.2. Резонансное смещение нейтрали в сетях 3..35 кВ

«Правила устройства электроустановок» для электрических сетей напряжением 3..35 кВ предусматривают работу с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор. Это мероприятие повышает надежность электроснабжения и сроки службы трансформаторов и выключателей, поскольку однофазные короткие замыкания на землю характеризуются малыми токами и допустимы на достаточно длительное время. Так как этот вид коротких замыканий нередко сопровождается электрической дугой, для ее прерывания требуется компенсация емкостного тока проводов линии с помощью дугогасящего реактора. Компенсация емкостного тока должна применяться при значениях этого тока в нормальных режимах более 10 А в сетях напряжением 3-20

кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ, а при деревянных опорах – при токах более 30 А при напряжении 6 кВ и 20 А при напряжении 10 кВ.

**Принцип работы** дугогасящего реактора поясняется рис. 15.2 для ситуации короткого замыкания в фазе С. При таком коротком замыкании на емкости провода А оказывается напряжение  $U_{AC}$ , вектор тока  $I_A$  опережает на  $90^\circ$  вектор  $U_{AC}$  (или отстает на  $90^\circ$  от вектора  $U_{CA}$ ), на емкости провода В действует напряжение  $U_{BC}$  и ток  $I_B$  опережает на  $90^\circ$  это напряжение. На дугогасящем реакторе напряжение равно  $-U_C$ , и ток  $I_P$  отстает от напряжения  $-U_C$  на  $90^\circ$ . Если токи  $I_A$  и  $I_B$  одинаковы и соблюдается условие  $\omega L_P = \frac{1}{\omega(C_A + C_B + C_C)}$ , то сумма токов  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_P$ , равная току  $I_C$ , равна нулю, и дуга установившегося тока короткого замыкания не может возникнуть.

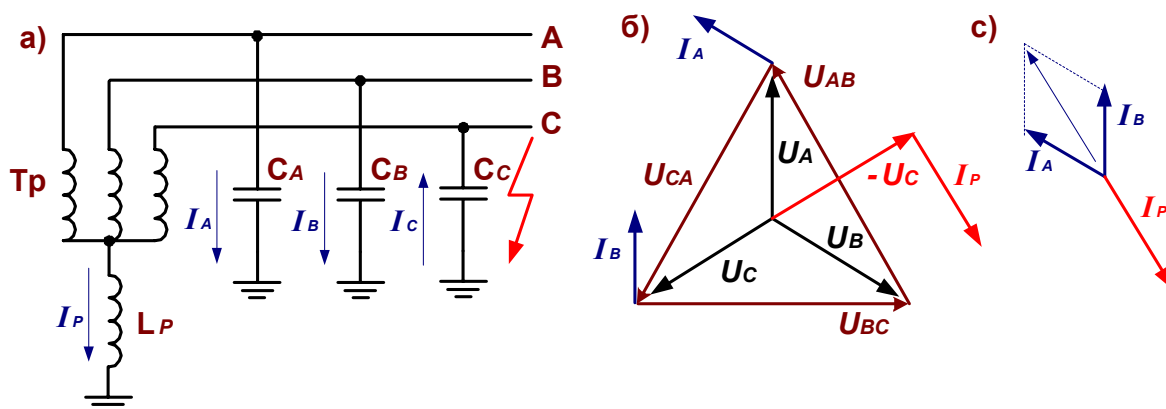


Рис. 15.2. Схема включения дугогасящего реактора (а), векторная диаграмма напряжений (б) и сумма токов (с)

Однако при отсутствии замыкания на землю подключение дугогасящего реактора может вызвать резонансное смещение нейтрали, что обычно сопровождается квазистационарными перенапряжениями. Дело в том, что **при идеальной настройке** реактора при нормальной работе системы напряжение на реакторе равно  $\dot{U}_P = \dot{U}_{NO} \frac{\omega L_P}{R_P}$ , где  $\dot{U}_{NO}$  - напряжение на нейтрали трансформатора при отсутствии дугогасящего реактора,  $R_P$  - активное сопротивление реактора. Если система полностью симметрична, то  $\dot{U}_{NO}$  равно нулю, но полной симметрии не бывает, а отношение  $\frac{\omega L_P}{R_P}$  велико (порядка нескольких десятков), поэтому смещение нейтрали нормального режима может существенно превышать фазное напряжение. **Для снижения напряжения на реакторе в нормальном режиме** улучшают сим-



метрию системы, а также вводят некоторую расстройку реактора от резонанса. Большая несимметрия возникает при неодновременной работе фаз выключателей, поэтому важно обеспечить минимальный разброс в действии фаз (в пределах 2..4 полупериодов частоты 50 Гц).

### 15.3. Перенапряжения при гашении дуги

Большинство коммутаций в цепях высокого напряжения сопровождаются возникновением электрической дуги, которая представляет собой вид электрического разряда, характеризуемый большой плотностью тока и термической ионизацией молекул газа. Скорость снижения тока при гашении дуги определяет возникающие перенапряжения в сети.

Условия существования дуги и ее характеристики зависят от скорости ее охлаждения. При токах более 200-300 А и неподвижной дуге в воздухе средний градиент потенциала на дуге составляет 8..10 В/см. Если напряжение на размыкаемых контактах меньше 15..20 В, то дуга возникнуть не может и ток прерывается за очень короткое время (менее 1 мс), что при больших токах и значительных индуктивностях в цепи приводит к большим перенапряжениям. При небольших токах, менее 0,4..1 А, не обеспечивается баланс тепла в дуге и размыкание цепи сопровождается многочисленными неустойчивыми разрядами со значительными перенапряжениями.

При достаточно больших токах и напряжениях на размыкаемых контактах возникает устойчивая дуга, свойства которой определяются вольт-амперной характеристикой (статической для установившейся дуги постоянного тока и динамической при отключении или при переменном напряжении). Для иллюстрации влияния скорости гашения дуги на возникающие перенапряжения достаточно рассмотреть процессы в простейшей цепи постоянного тока с резистором и катушкой по рис. 15.3.

Согласно второму закону Кирхгофа  $U = iR + L \frac{di}{dt} + u_{\delta}$ . При расположении вольт-амперной характеристики дуги по рис. 15.4а и токе  $i > I_1$  получается  $L \frac{di}{dt} = U - iR - u_{\delta} > 0$ , так что ток в цепи растет вплоть до значения  $I_2$ , и при токе  $I_2$  получается  $L \frac{di}{dt} = U - iR - u_{\delta} = 0$ , изменения тока не будет и дуга будет гореть длительно. Точка  $i = I_1$  является точкой неустойчивого равновесия.

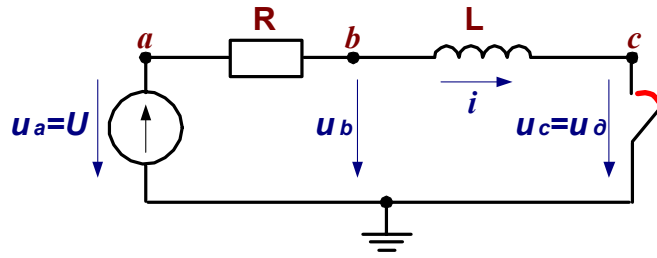


Рис. 15.3. Схема цепи постоянного тока

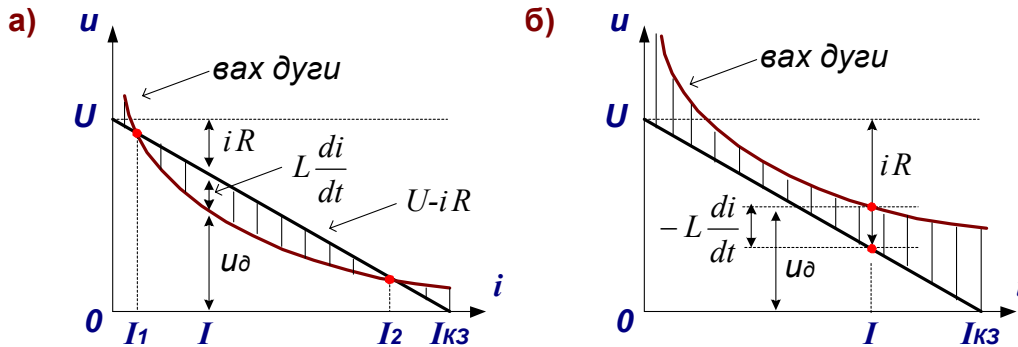


Рис. 15.4. Вольтамперная характеристика устойчивой (а) и неустойчивой (б) электрической дуги

Чтобы дуга могла погаснуть, необходимо увеличивать  $u_{\delta}$ , например, путем растягивания дуги. Если ее вольтамперная характеристика будет везде выше прямой  $(U - iR)$ , как на рис. 15.4б, то везде  $L \frac{di}{dt} = U - iR - u_{\delta} < 0$ , источник питания не сможет поддерживать дугу, ток будет уменьшаться и дуга погаснет. Скорость снижения тока при этом будет определяться параметрами цепи и скоростью удлинения дуги. Удлинение дуги может быть естественным, как в роговых разрядниках, или принудительным под действием магнитного поля; изменение вольтамперной характеристики дуги может быть и под действием принудительного ее охлаждения.

При переменном напряжении ток дуги периодически снижается до нуля и дуга полностью прекращается. Если восстанавливающееся напряжение на промежутке меньше пробивного напряжения промежутка, то дуга возникнуть больше не может и ток естественным образом прекращается; по этой причине гашение дуги переменного тока происходит значительно легче гашения дуги постоянного тока.

Потенциалы точек схемы рис. 15.3 меняются во времени, что показано на рис. 15.5. Потенциал точки  $b$  определяется равенством  $u_b = U - iR$ , а потенциал точки  $c$ , то есть напряжение на дуге, равен

$$u_c = U - iR - L \frac{di}{dt} = U - iR + \left| L \frac{di}{dt} \right| = u_b + L \left| \frac{di}{dt} \right|.$$

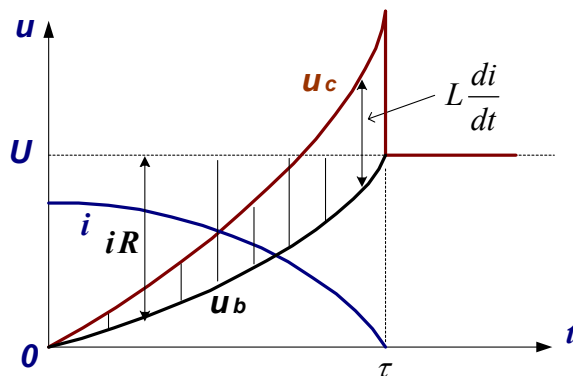


Рис. 15.5. Перенапряжения при гашении дуги

На рис. 15.5 показано кривая изменения во времени напряжения в точке  $b$ , из которой хорошо видно, что возникающее перенапряжение определяется скоростью снижения тока в цепи.

#### 15.4. Коммутационные перенапряжения

Коммутационные перенапряжения возникают при **включении ненагруженной линии**, при котором на квазистационарное перенапряжение за счет емкостного эффекта накладываются затухающие колебания на емкости и индуктивности линии, частота которых зависит от длины линии. Амплитуда колебательной составляющей максимальна при угле включения  $90^\circ$  или  $270^\circ$  и величина ее составляет порядка двух амплитуд установившегося режима. При совпадении частоты собственных колебаний линии с частотой сети амплитуда колебательной составляющей может достигнуть десятикратной величины вынужденной составляющей. Для снижения этого типа перенапряжений используют следующие меры:

- шунтирующие резисторы с двухступенчатым включением, сначала с резистором сопротивлением 600..1200 Ом, а затем через 10..20 мс шунтирование этого резистора (рис. 15.6);

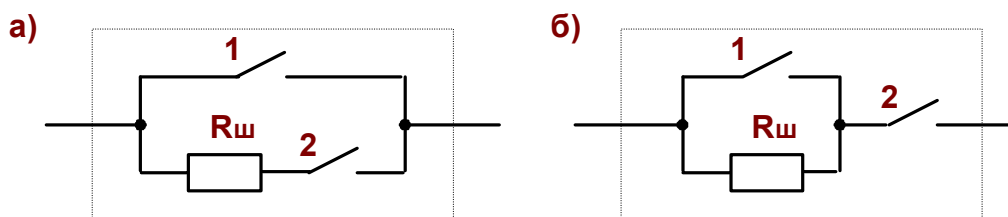


Рис. 15.6. Схемы выключателя с шунтирующим резистором

- применение выключателей, позволяющие выбирать наиболее благо-

приятный момент включения;

- использование вентильных разрядников и ОПН для ограничения перенапряжений;
- секционирование линий на участки длиной не более 250..300 км.

При **автоматическом повторном включении** после однофазного или двухфазного замыкания переходный процесс отличается от включения ненагруженной линии возможным наличием зарядов на неповрежденных фазах линии. Заряд на линии без реакторов стекает на землю через активные проводимости изоляторов, и в среднем для сухой погоды при задержке АПВ на 0.4 с напряжение оставшихся зарядов составляет 60-70% первоначального. В целом перенапряжения при АПВ обычно выше, чем при включении ненагруженных линий.

Значительные коммутационные перенапряжения могут возникать не только при включениях, но и **при отключениях ненагруженных линий и конденсаторных батарей**. Значительные перенапряжения при отключении емкостного элемента могут возникнуть из-за повторных пробоев между расходящимися контактами выключателя. Пробивное напряжение межконтактного промежутка гораздо быстрее расщепляется у воздушных выключателей с их быстрым перемещением контактов и интенсивным дутьем, чем у масляных выключателей. При переходе тока через ноль дуга прекращается, а через полпериода из-за остающегося на емкостном элементе напряжения восстанавливающееся напряжение на контактах составит двойную амплитуду сетевого напряжения, и если оно окажется больше пробивного напряжения, то возникает повторное включение цепи. Следующий обрыв тока произойдет при прохождении тока через нулевое значение и может опять произойти повторной пробой. Коммутация представляет собой серию чередующихся отключений и включений с пробоями на максимумах напряжений и раскачиванием процесса в отключаемой цепи.

Из-за больших значений возникающих перенапряжений подобного типа целесообразно применять выключатели, не дающие повторных зажиганий в процессе отключения ненагруженных линий и конденсаторных батарей.

К появлению перенапряжений приводит и **отключение коротких замыканий**, поскольку при этом из-за селективности защиты отключается только часть линии, а оставшаяся часть представляет собой линию, на которой восстанавливается напряжение после отключения ближнего к короткому замыканию выключателя. Наличие на линии устройства продольной компенсации приводит к увеличению перенапряжений, которые могут превысить трехкратное значение амплитуды напряжения источника питания линии.

**Отключение ненагруженного трансформатора** (и любого другого индуктивного элемента) сопровождается возникновением при срезе тока выключателем затухающих колебаний большой амплитуды в контуре ин-

дуктивность трансформатора – емкость цепи. Возникающие при этом повторные зажигания дуги в выключателе ограничивают возникающие перенапряжения, однако при большом количестве повторных зажиганий больше и перенапряжения, которые могут достигнуть четырех амплитуд рабочего напряжения и более. Разрядники, устанавливаемые на трансформаторном присоединении, ограничивают перенапряжения.

### **РЕЗЮМЕ**

Емкостная генерация в линии электропередачи приводит к повышению напряжения на удаленном от генератора ненагруженном конце линии.

В сетях с изолированной нейтралью квазистационарные перенапряжения возникают при однофазных замыканиях на землю. В сетях с компенсированной нейтралью возможно большое смещение нейтрали в нормальном режиме из-за несимметрии отдельных фаз линии.

Гашение электрической дуги приводит к возникновению в сети перенапряжений, определяемых скоростью спада тока при гашении дуги.

При включении и отключении ненагруженных линий, при отключении конденсаторных установок и ненагруженных трансформаторов возникают коммутационные перенапряжения большой величины.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните причины емкостного эффекта, приводящего к повышению напряжения на конце ненагруженной линии электропередачи.
2. В чем причины смещения нейтрали в сети с компенсированной нейтралью?
3. Почему гашение электрической дуги приводит к перенапряжениям?
4. Каковы причины возникновения перенапряжений при коммутациях линий, конденсаторов, реакторов и трансформаторов?

## **Лекция 16. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

### **16.1. Координация изоляции**

Изоляция нового оборудования на заводе-изготовителе подвергается испытаниям повышенным напряжением. Совокупность испытательных напряжений, которым подвергается изоляция нового оборудования, принято называть **уровнем изоляции** оборудования; минимальным уровнем изоляции называют совокупность испытательных напряжений, которыми испытывается изоляция периодически в процессе эксплуатации.

Выбор изоляции оборудования производят с учетом характеристик защитных разрядников и других применяемых способов ограничения перенапряжений. Под **координацией изоляции** понимается установление и поддержание в эксплуатации необходимого соотношения между уровнем изоляции и воздействующими на нее напряжениями.

На изоляцию воздействует прежде всего **рабочее напряжение**. Для сетей до 35 кВ, работающих с изолированной или резонансно заземленной нейтралью, расчетным рабочим напряжением является наибольшее рабочее линейное напряжение сети. Для оборудования, предназначенного для работы в сетях с эффективно заземленной нейтралью, за расчетное рабочее напряжение принимают наибольшее рабочее фазное напряжение сети.

Кроме того, на изоляцию действуют и **внутренние перенапряжения**. Расчетные кратности внутренних перенапряжений выбираются в соответствии с применяемыми типами защитного оборудования; в случае применения ОПН расчетные кратности внутренних перенапряжений берут пониженными (табл. 16.1, [1]).

Таблица 16.1

Расчетные кратности  $k_{п}$  внутренних перенапряжений

$U_{ном}$ , кВ	110	150	220	330	500
$k_{п}$ без ОПН	3.2	3.0	3.0	2.7	2.5
$k_{п}$ при ОПН	2.3-2.5	2.4	2.2	2.2	2.2

Воздействие **грозовых перенапряжений**, отличающихся весьма малыми временами нарастания напряжения, отличается от воздействия внутренних перенапряжений эффектами отражения падающих волн от конца линии с увеличением (до удвоения) амплитуды перенапряжения. Поскольку защитные элементы устанавливаются на некотором расстоянии от защищаемого оборудования, то при выборе расчетных значений грозовых перенапряжений остающееся напряжение на разряднике или на ОПН (соответствующее току координации) умножают на коэффициент, учитывающий перепад напряжения между разрядником и защищаемым объектом. Обычно коэффициент принимают равным 1.2 для силовых трансформаторов (разрядники располагают достаточно близко к трансформаторам) и 1.3-1.4 для остального оборудования.

**Уровни изоляции** высоковольтного оборудования задаются по ГОСТ 1516.1-76, который устанавливает для каждого класса напряжения испытательные напряжения промышленной частоты и импульсные испытательные напряжения. ГОСТ 1516.2-97 устанавливает методику проведения испытаний.

**Для линий электропередачи** координация изоляции предусматривает такой ее выбор, при котором обеспечивается весьма малое среднее число перекрытий и требуемый срок службы с учетом загрязнения и увлажнения изоляции. Обычно принимают среднее число перекрытий изоляции

для линии типовой длины равным 1 раз в 10 лет.

*Для изоляции подстанций* в связи с высокой стоимостью оборудования показатель надежности принимается значительно более высоким, примерно один отказ в 50-100 лет.

## 16.2. Устройства для защиты от перенапряжений

Для защиты линий и оборудования подстанций от перенапряжений используют следующие устройства:

- искровые промежутки, разрядники и ОПН для защиты отдельных точек на линии;
- тросы и заземления опор на линиях;
- роговые разрядники, трубчатые разрядники на контактной сети;
- молниеотводы;
- разрядники и ОПН на подстанциях;
- в отдельных случаях – конденсаторы для снижения грозовых перенапряжений.

*Защитное действие* тросов и молниеотводов основано на отводе тока молнии от защищаемого оборудования. Остальные защитные устройства выполняют две функции:

- присоединение защищаемой цепи к заземлителю при воздействии перенапряжения (непосредственная защитная функция);
- отключение защищаемой цепи от заземления при окончании действия перенапряжения, что часто связано с отключением возникшего короткого замыкания в защищаемой цепи.

### 1. Искровые промежутки и роговые разрядники

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

Параметры искровых промежутков приведены в табл. 16.2 (по данным работы [7]).

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

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

ских машин;

- большой статистический разброс пробивных напряжений затрудняет координацию изоляции;
- вольт-секундная характеристика искрового промежутка из-за резкой неоднородности поля имеет подъем в области малых времен, соответствующих грозovým перенапряжениям, и защищаемая изоляция может остаться незащищенной (рис. 16.1).

Таблица 16.2

Параметр	Номинальное напряжение, кВ				
	3	6	10	35	110
Длина основного промежутка, мм	20	40	60	250	650
Длина дополнительного промежутка, мм	5	10	15	30	-
Амплитуда пробивного напряжения 50 Гц, кВ ампл.	28	48	63	148	356
Импульсное пробивное напряжение, кВ (для отрицательного импульса)	34	52	67	220	510

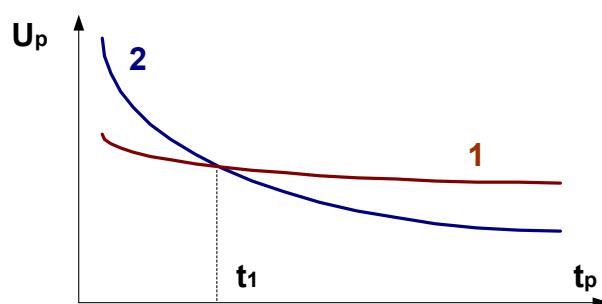


Рис. 16.1. Вольт-секундные характеристики изоляции (1) и искрового промежутка с резконеоднородным полем (2)

Достаточно широко применяемые на контактной сети роговые разрядники выполняются либо с одним искровым промежутком, либо с двумя искровыми промежутками (рис. 16.2). Действующие «Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети» требуют применения роговых разрядников с двумя искровыми промежутками.



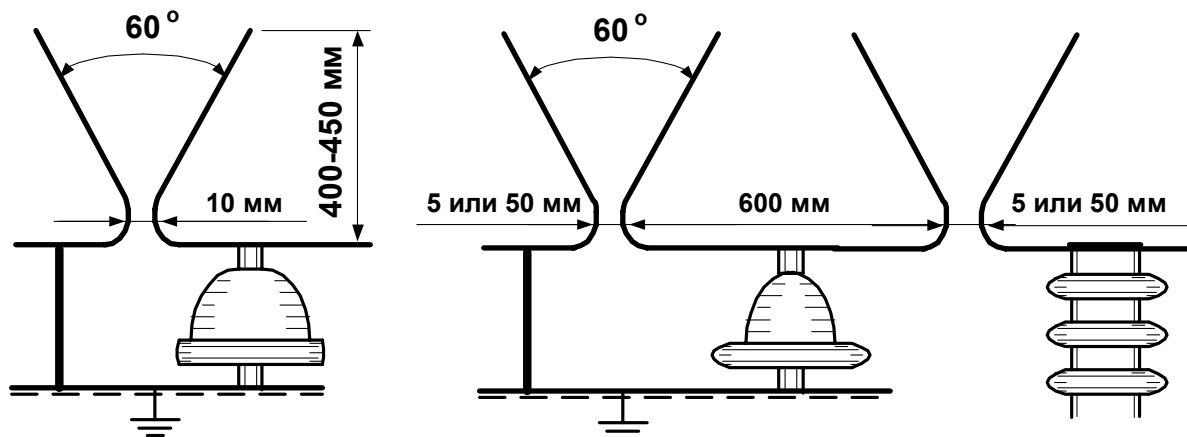


Рис. 16.2. Роговые разрядники, применяемые на контактной сети

Параметры роговых разрядников приведены в табл. 16.3 (по данным работы [2]).

Таблица 16.3

Параметр	С одним искр. промежутком		
	С одним искр. промежутком	С двумя искровыми промежутками	
Напряжение к/с, кВ	3.3	3.3	25
Расстояние, мм	10..11	4,5..5,5	40..50
Амплитуда пробивного напряжения 50 Гц, кВ ампл.	33	33	95
Импульсное пробивное напряжение, кВ	35	25	190
Наибольший ток, при котором дуга может погаснуть самостоятельно, кА	3	7	-
Время гашения дуги, с	0,25..0,6	0,2..0,6	-

Способность гашения дуги роговым разрядником сильно зависит от скорости и направления ветра. Дуга гаснет быстрее при направлении ветра перпендикулярно плоскости разрядника.

## 2. Трубчатые разрядники

Трубчатые разрядники (рис. 16.3) представляют собой разновидность искровых промежутков, дополненных приспособлением для принудительного гашения дуги, которое выполнено в виде трубки из газогенерирующего материала (винипласт или менее прочный фибробакелит). Защитная функция трубчатым разрядником выполняется так же, как и простым искровым промежутком, с теми же недостатками; отключение дуги сопровождающего тока короткого замыкания производится из-за интенсивного газовыделения трубкой при повышенной температуре горения дуги. Специфическим недостатком трубчатого разрядника является наличие зоны выхлопа разрядника.

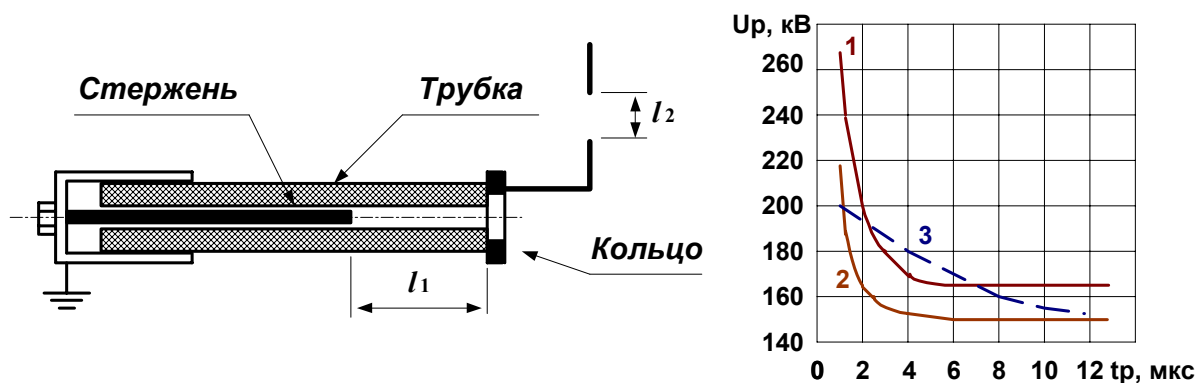


Рис. 16.3. Устройство трубчатого разрядника и вольт-секундные характеристики разрядника РТФ-35/0.8-5 при  $l_2=60$  мм (1),  $l_2=40$  мм (2), рогового разрядника 2x50 мм (3)

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

Основное применение трубчатых разрядников сводится к защите подходов к подстанциям, защите оборудования маломощных подстанций 3-10 кВ и защита контактной сети переменного тока.

### 3. Вентильные разрядники

Вентильные разрядники являются другой разновидностью искровых промежутков, отличающихся слабой неоднородностью электрического поля и нелинейным резистором для гашения дуги. Защитная функция вентильным разрядником выполняется так же, как и простым искровым промежутком, но в связи с однородностью электрического поля вольт-секундная характеристика разрядника существенно лучше, чем у трубчатого, и меньше статистический разброс пробивных напряжений. Отключение возникшего короткого замыкания производится с помощью нелинейного резистора, включенного последовательно с искровым промежутком; сопротивление этого резистора велико при рабочем напряжении и резко снижается при повышенном напряжении.

Простейший единичный промежуток вентильного разрядника показан на рис. 16.4а. Промежуток составлен двумя латунными электродами, разделенными миканитовой шайбой.

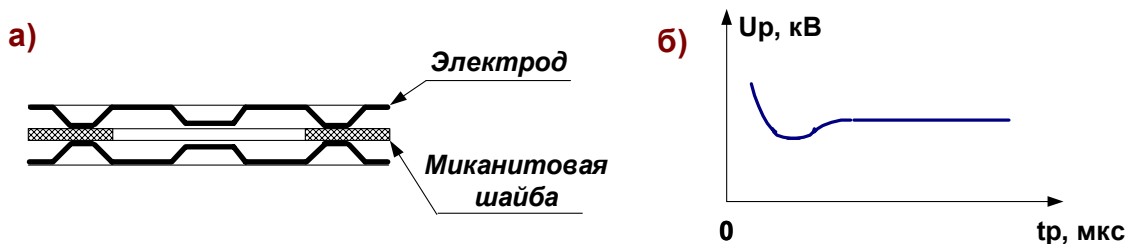


Рис. 16.4. Единичный искровой промежуток с неподвижной дугой (а) и вид вольт-секундной характеристики разрядника с многократным искровым промежутком (б)

Единичные промежутки включаются последовательно друг с другом для улучшения гашения дуги, которая нестабильна в небольшом промежутке с холодными электродами. У многократного искрового промежутка, однако, происходит неравномерное распределение напряжения на отдельных промежутках, аналогично гирлянде изоляторов, что приводит к снижению пробивного напряжения при малых временах порядка 2-4 мкс (рис. 16.4б).

**Группа характеристик** вентильного разрядника, определяющая его защитную функцию, составлена следующими характеристиками:

- номинальное напряжение;
- наибольшее допустимое длительное напряжение на разряднике;
- пробивное напряжение на частоте 50 Гц (обычно действующее значение);
- остающееся напряжение на сопротивлении резистора при определенном импульсном токе (от 5 до 14 кА, в зависимости от типа разрядника), называемом током координации (рис.16.5).

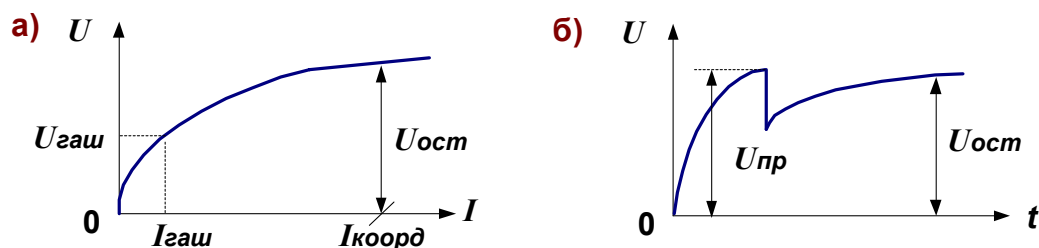


Рис. 16.5. Вольтамперная характеристика резистора вентильного разрядника (а) и напряжение на вентильном разряднике при его срабатывании (б)

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

Еще одной характеристикой разрядника является его пропускная способность, то есть минимальное количество нормированных импульсов тока, который разрядник должен выдержать без существенного изменения его свойств. Это количество обычно равно 20.

Таким образом, и защитная функция, и отключение короткого замыкания определяются как искровым промежутком, так и нелинейным резистором.

#### 4. Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН)

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

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

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

### 16.3. Основные принципы грозозащиты линий и контактной сети

Высокую надежность грозозащиты воздушных линий электропередачи обеспечивают *следующие мероприятия*:

- подвеска грозозащитных тросов с достаточно малыми углами защиты;
- снижение импульсного сопротивления опор;
- повышение импульсной прочности изоляции линий и снижение вероятности установление дуги (в частности, этому способствует использование деревянных траверс и опор);
- применение изолированной нейтрали или дугогасящего реактора;
- использование автоматического повторного включения линий.

Для *линий напряжением 220 кВ и выше*, сооружаемых обычно на металлических или железобетонных опорах, основным средством грозозащиты являются тросы, располагаемые над фазными проводами. Импульсное сопротивление заземлений опор, к которым присоединяются тросы, должно быть не более 15 Ом для линий 220 кВ, а для линий 110 кВ с железобетонными опорами – не более 20 Ом. При грунтах с удельным сопро-

тивлением более 1000 Ом\*м разрешаются более высокие значения сопротивления заземлений. Для уменьшения потерь энергии, возникающих из-за наведенного напряжения 50 Гц в контуре земля-опора-трос-опора-земля, заземление тросов производят не на каждой опоре, подвешивая трос на одном-двух изоляторах, зашунтированных искровым промежутком. Дополнительным средством уменьшения грозопоражаемости линий 220 кВ и выше является использование АПВ.

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

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

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

- пересечения линий электропередачи между собой или с другими линиями;
- опоры со сниженной электрической прочностью изоляции и высокие опоры переходных пролетов;
- ответвления к подстанциям на отпайках и секционирующие разъединители на линиях;
- кабельные вставки на линиях.

Грозозащита **контактной сети** электрифицированной железной дороги имеет ряд особенностей по сравнению с линиями электропередачи. Прямые удары молнии в контактную сеть всегда приводят к перекрытию изоляции, и защита от таких перекрытий экономически нецелесообразна, поэтому принимают меры к предотвращению длительного протекания через место перекрытия сопровождающего тока короткого замыкания путем отключения фидера и АПВ. Для защиты изоляции контактной сети от атмосферных и коммутационных перенапряжений применяются разрядники (роговые, трубчатые, вентильные) или ОПН.

**На контактной сети постоянного тока** роговые разрядники или ОПН устанавливаются:

- у анкеровок проводов контактной сети;
- на неизолирующих и изолирующих сопряжениях контактной сети;
- у искусственных сооружений при анкеровках контактной сети;
- на питающих линиях у мест присоединения к контактной сети.

**На контактной сети переменного тока** роговые разрядники или ОПН устанавливают:

- с обеих сторон у изолирующих сопряжений и нейтральных вставок;
- у мест присоединения по каждому пути автотрансформаторных пунктов 2х25 кВ;
- у отсасывающих трансформаторов;
- на конце консольных участков контактной сети, состоящих из двух или более анкерных участков;
- у мест присоединения питающих линий к контактной сети (при наличии на фидерах тяговой подстанции ОПН-25 разрядники не устанавливают);
- в местах, подверженных частым грозовым разрядам, у анкеровок проводов контактной сети по решению службы электроснабжения железной дороги.

ОПН к контактной сети подключают через роговой разрядник с одинарным воздушным промежутком 10 мм для постоянного тока и 80 мм для переменного тока, зашунтированным плавкой вставкой.

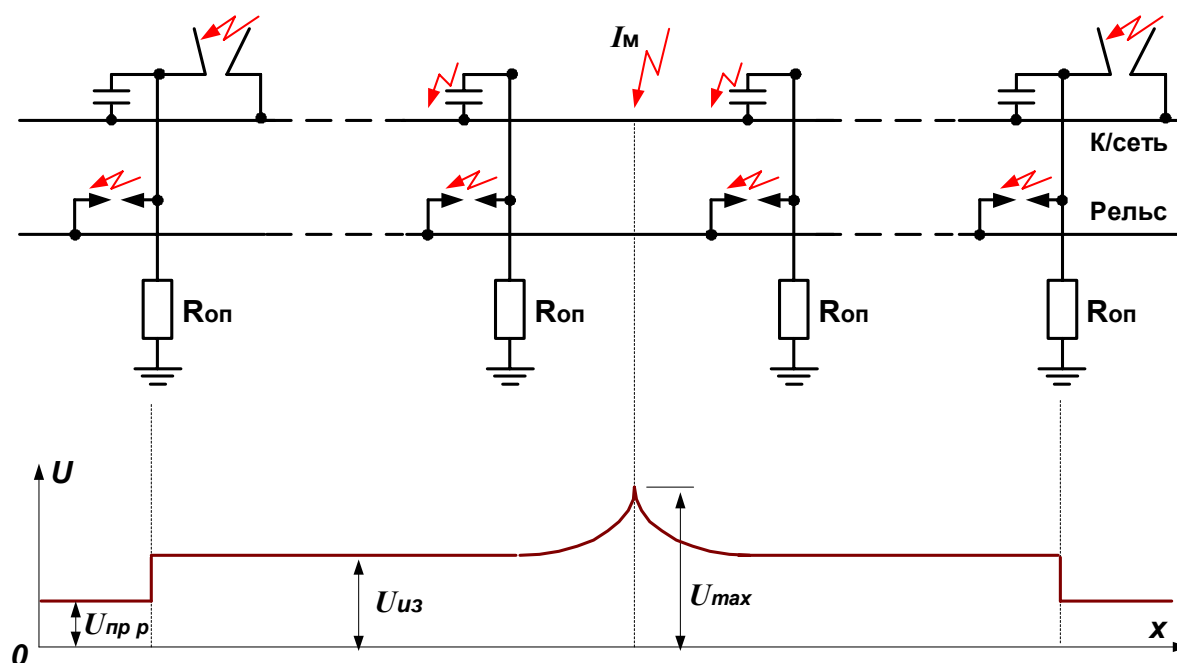


Рис. 16.6. Ограничение распространения перенапряжения вдоль контактной сети

Разрядники позволяют ограничить распространение максимальных напряжений вдоль контактной сети и предотвращают появление электри-

ческой дуги на изоляторах в месте удара молнии (рис. 16.6), поскольку после пробоя разрядников источники рабочего напряжения оказываются замкнутыми через разрядники на землю. Максимальные перенапряжения возникают внутри участка между перекрытыми опорами, а вне зоны, ограниченной разрядниками, уровень перенапряжения ограничен уровнем напряжения срабатывания разрядников.

#### 16.4. Основные принципы защиты подстанций

Надежность защиты подстанций от перенапряжений должна быть значительно выше надежности защиты линий, поскольку ущерб от повреждения здесь значительно больше, а уровень изоляции ниже. **Основные принципы защиты** оборудования подстанций сводятся к следующему:

- защита от прямых ударов молнии стержневыми молниеотводами;
- защита оборудования от волн, приходящих с линии, с помощью разрядников или ОПН;
- защита подходов линий от прямых ударов молнии.

**Зоны защиты молниеотводов** определены опытным путем исходя из того, что вероятность прорыва молнии в защищаемый объект не превосходит 0.05 (одно попадание прямого удара из двадцати ударов), иногда – 0.005.

Для успешной **защиты оборудования от волн**, набегающих с линии, разрядник должен иметь пробивное и остающееся напряжение ниже допустимого на защищаемом объекте на некоторую величину, называемую интервалом координации, который должен составлять не менее 15% уровня допустимого напряжения. Особенностью перенапряжений на подстанции является их существенная зависимость от крутизны фронта набегающей волны и слабая зависимость от амплитуды набегающей волны. Амплитуда влияет лишь на величину остающегося напряжения, слабо меняющегося благодаря пологой вольтамперной характеристике нелинейного резистора разрядника или ОПН. Величина перенапряжения зависит от крутизны набегающей волны потому, что при прохождении волны от объекта до разрядника (если объект оказался первым по ходу волны) и обратной волны от сработавшего разрядника до объекта подъем напряжения на объекте за время двойного пробега прямо определяется скоростью нарастания напряжения падающей волны.

При продвижении волны вдоль линии фронт волны сглаживается (удлиняется) за счет импульсной короны, потерь в земле и в проводах, поэтому выполняют **защиту подходов линий от прямых ударов молнии** на определенной длине (рис. 16.7), что к тому же снижает величину тока в разрядниках подстанции. Количество и места установки ОПН и разрядников выбирают так, чтобы расстояние между разрядниками и защищаемыми

объектами не превышали безопасной величины (от 30 м до 150 м для разных случаев).

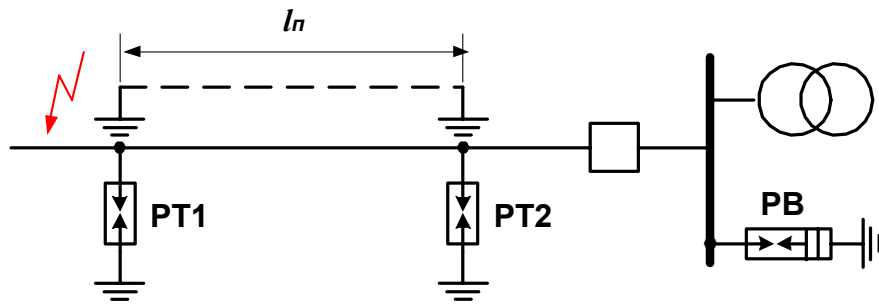


Рис. 16.7. Схема защищенного подхода линии электропередачи

При защите подхода линии грозозащитные тросы подвешивают даже в случае их отсутствия на других участках линии, трос заземляют на каждой опоре, а сопротивление заземления опоры выдерживают на уровне не более 10-20 Ом. В начале подхода устанавливают трубчатый разрядник, способствующий ограничению амплитуды тока в разряднике подстанции. Второй трубчатый разрядник РТ2 предназначен для защиты выключателя. На подстанциях напряжений 110-220 кВ обычно устанавливают один комплект разрядников на каждую систему шин. Длина защищаемого подхода составляет обычно 1-2 км.

Подстанции напряжением 3..20 кВ имеют обычно кабельные вводы, поскольку подвести к подстанции большое число воздушных линий сложно. Обобщенная схема защиты от перенапряжений такой подстанции показана на рис. 16.8.

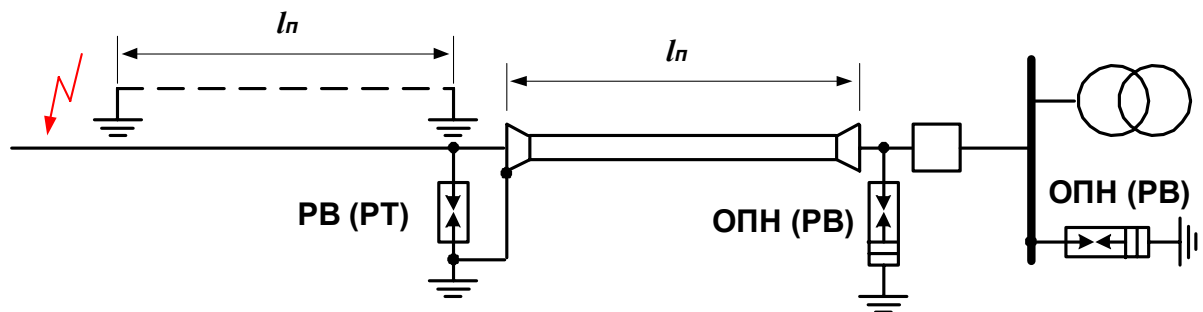


Рис. 16.8. Обобщенная схема защиты подстанции 3-20 кВ

Наличие кабельной вставки на входе такой подстанции обычно не обеспечивает достаточной грозоупорности подстанции из-за неизбежных многократных отражений волн в кабельной линии. Поэтому в месте соединения воздушной линии с кабельной устанавливают вентильный или трубчатый разрядник для ограничения приходящей волны. Вентильный разрядник в конце кабеля устанавливается из-за возможности повреждения кабельной муфты из-за удвоения волны при отключенном выключателе.



## ***РЕЗЮМЕ***

Для изоляции электроустановок устанавливают и поддерживают необходимое соотношение между уровнем изоляции и воздействующими на нее напряжениями, называемое координацией изоляции. Обычно принимают для линий электропередачи среднее число перекрытий изоляции линии типовой длины равным 1 раз в 10 лет, для изоляции подстанций показатель надежности принимается равным примерно одному отказу в 50-100 лет.

Для защиты линий и оборудования подстанций от перенапряжений используют искровые промежутки, разрядники и ОПН, тросы и заземления опор на линиях, роговые разрядники, трубчатые разрядники на контактной сети, молниеотводы, конденсаторы для снижения грозových перенапряжений.

Основные принципы защиты оборудования подстанций сводятся к защите от прямых ударов молнии стержневыми молниеотводами, защите оборудования от волн, приходящих с линии, с помощью разрядников или ОПН, и к защите подходов линий от прямых ударов молнии.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называют координацией изоляции?
2. Каковы принципы защиты изоляции искровыми промежутками и роговыми разрядниками?
3. Каковы принципы защиты изоляции трубчатыми и вентильными разрядниками и ОПН?
4. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции линий электропередачи?
5. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции контактной сети?
6. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции оборудования подстанций?

## Заключение

1. Превышение напряжения на изоляции выше критического значения приводит к пробое изоляции. Значение пробивного напряжения зависит от свойств изоляционного материала, структуры электрического поля в изоляционном промежутке и скорости нарастания пробивного напряжения на промежутке.

Пробой изоляции происходит из-за явлений ударной ионизации, фотоионизации в объеме газа, термической ионизации, эмиссии электронов из катода. В жидкостях особое значение имеют тепловые процессы и наличие примесей, в твердой изоляции при пробое происходят электрические, тепловые и электрохимические процессы.

Пробивное напряжение газового промежутка с однородным и слабонеоднородным электрическим полем зависит от произведения относительной плоскости газа на расстояние между электродами. Эта зависимость характеризуется снижением электрической прочности при увеличении расстояния между электродами при условиях, близких к нормальным и имеет минимум при очень низких давлениях или очень малых расстояниях между электродами.

Разрядный промежуток с электродами типа стержень – плоскость характеризуется существенно меньшей электрической прочностью по сравнению с промежутком с однородным и слабонеоднородным электрическим полем, наличием явления короны и двойным эффектом полярности. При отрицательном стержне корона начинается при существенно меньшем напряжении, чем при положительном, а пробивное напряжение при положительном стержне меньше, чем при отрицательном.

При быстром подъеме напряжения разрядное напряжение оказывается связанным с предразрядным временем, эта зависимость называется вольт-секундной характеристикой изоляционного промежутка. Вольт-секундная характеристика определяется на стандартных грозовых импульсах.

Напряжение перекрытия проходных изоляторов существенно меньше напряжения перекрытия опорных изоляторов при одинаковой длине пути перекрытия.

2. Среди изоляторов по расположению токоведущей части различают опорные, проходные и подвесные изоляторы, по конструктивному исполнению различают тарельчатые, стержневые и штыревые изоляторы, а по месту установки различают линейные и станционные изоляторы.

К основным характеристикам изоляторов относят номинальное напряжение, разрядные напряжения, геометрические параметры и механические характеристики.

На контактной сети используются подвесные изоляторы, фиксаторные изоляторы, консольные изоляторы, секционирующие изоляторы, шты-

ревые изоляторы и опорные изоляторы.

Напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов, распределяется неравномерно, и наибольшее напряжение оказывается на изоляторе, ближайшем к проводу.

3. Изоляция силовых трансформаторов разделяется на внешнюю и внутреннюю. Внутренняя изоляция делится на главную и продольную. Главная изоляция силовых трансформаторов чаще всего выполняется маслобарьерного типа, а продольная изоляция – слоями электроизоляционной бумаги, накладываемой поверх провода.

Проходные изоляторы высокого напряжения имеют неблагоприятное расположение электродов, слабую механическую прочность на изгиб и характеризуются нагревом изоляционного тела изолятора. Наиболее распространенной конструкцией проходного изолятора является конденсаторный ввод.

От силовых конденсаторов требуется обеспечение необходимой емкости, рабочего напряжения и тепловой устойчивости, что определяется изоляцией конденсатора. В качестве изоляции используется пропитанная конденсаторная бумага и полимерные пленки. Electroдами в силовых конденсаторах является алюминиевая фольга толщиной 7..12 мкм.

Изоляция силовых кабелей выполняется либо слоями кабельной бумаги, пропитанной вязкими маслоканифольными компаундами или кабельными маслами (нефтяными или синтетическими), либо из пластмасс. В кабелях 110 кВ и выше применяется бумажная изоляция с менее вязкой пропиткой и поддержанием избыточного низкого или высокого давления масла.

В электрических машинах высокого напряжения изоляцию обмоток статоров разделяют на главную изоляцию, на междуфазную изоляцию и на продольную изоляцию.

4. В процессе эксплуатации изоляции на нее воздействуют частичные разряды, тепловые и механические нагрузки, из окружающего воздуха проникает влага. Все это приводит к появлению сосредоточенных и распределенных дефектов изоляции.

Методы контроля состояния изоляции подразделяются на неразрушающие методы, производимые при пониженных напряжениях и при рабочих напряжениях, и на разрушающие методы контроля, предполагающие использование напряжений, повышенных по сравнению с рабочими.

5. Измерение сопротивления изоляции позволяет контролировать как сплошное увлажнение изоляции, так и увлажнение только одного из слоев в слоистой изоляции. При измерении сопротивления изоляции принимают во внимание прежде всего абсолютную величину сопротивления  $R_{60}$ , которая должна быть не меньше нормированного значения, а затем и коэффициент абсорбции. Если обе величины не выходят за пределы нормы, то говорят о том, что увлажнения изоляции не обнаружено; если хотя бы одна

из величин неудовлетворительна, то делают вывод о недопустимом увлажнении изоляции.

Контроль величины емкости изоляции позволяет выявлять слоистое увлажнение изоляции.

Для выявления повреждений в силовых трансформаторах используется хроматографический анализ растворенных в масле газов.

6. Измерение  $\text{tg } \delta$  – это один из основных методов контроля изоляции электрооборудования высокого напряжения. При измерениях контролируют абсолютную величину  $\text{tg } \delta$ , изменения  $\text{tg } \delta$  по сравнению с предыдущими измерениями, а в некоторых случаях снимают зависимость  $\text{tg } \delta$  от напряжения. Для измерения используют высоковольтный измерительный мост по схеме Шеринга.

Контроль частичных разрядов позволяет судить о темпах электрического старения изоляции. В электрическом методе контроля ЧР регистрируют скачок напряжения на изоляции и величину кажущегося заряда.

7. Испытания изоляции повышенным напряжением позволяют выявить локальные дефекты, не обнаруживаемые иными методами. Этот метод испытаний является прямым способом контроля способности изоляции выдерживать воздействия перенапряжений. При испытаниях повышенным напряжением используются три основных вида испытательных напряжений: повышенное напряжение промышленной частоты, выпрямленное постоянное напряжение и импульсное испытательное напряжение.

Все виды испытаний делятся на три основные группы: испытания новых изделий на заводе-изготовителе, испытания после прокладки или монтажа нового оборудования и после капитального ремонта, периодические профилактические испытания.

Изоляцию кабелей испытывают повышенным напряжением, измеряют сопротивление изоляции, а в некоторых случаях измеряют  $\text{tg } \delta$  изоляции.

У силовых трансформаторов измеряют пробивное напряжение трансформаторного масла, сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции, отношение  $C_2/C_{50}$ ,  $\text{tg } \delta$ , проводят испытания повышенным напряжением для обмоток напряжением 35 кВ и ниже. На заводе-изготовителе внутренняя и внешняя изоляция испытываются полными и срезанными стандартными грозвыми импульсами, а также переменным напряжением.

Основной вид контроля вводов высокого напряжения – периодический осмотр. У вводов напряжением 110-220 кВ измеряют  $\text{tg } \delta$  и проводят анализ и испытания проб масла и измерение сопротивления изоляции.

8. Контактная сеть является нерезервируемым элементом, поэтому к ее изоляции предъявляются повышенные требования по надежности функционирования; вместе с тем основной причиной неисправностей контактной сети является именно повреждения изоляторов – около одной трети всех неисправностей. Основными видами повреждений изоляции контакт-

ной сети являются перекрытия изоляторов из-за их загрязнения, пробой изоляторов из-за нарушения изоляционной части, перекрытия изоляторов птицами, механические изломы.

Фарфоровые тарельчатые изоляторы перед установкой испытываются повышенным напряжением и контролируются мегаомметром. Остальные изоляторы и изолирующие вставки контактной сети перед установкой осматривают и очищают от загрязнения.

Основными видами контроля изоляции контактной сети являются осмотры при обходах и объездах вагоном-лабораторией, диагностирование изоляторов производится приборами дистанционного контроля их состояния (приборами ультразвукового контроля, тепловизорами, электронно-оптическими дефектоскопами типа «Филин») или измерительными штангами.

9. Испытательные установки высокого переменного напряжения предназначены для получения высокого регулируемого переменного напряжения, с помощью которого испытывают изоляцию. Основным узлом установки является испытательный трансформатор, отличающийся малой мощностью, ограниченным временем включения, малым запасом электрической прочности изоляции. Для получения напряжений выше 1000 кВ используют каскадное соединение испытательных трансформаторов. Схема испытательной установки содержит испытательный трансформатор или каскад, регулировочный трансформатор и защитный резистор.

Для получения высокого постоянного напряжения при испытаниях изоляции используют выпрямительные установки. Выпрямительные установки делятся на две группы: установки однополупериодного выпрямления и установки, построенные по схемам умножения напряжения. Основная проблема высоковольтного выпрямителя – выравнивание обратного напряжения на последовательно включенных вентилях.

10. Для испытания изоляции коммутационными импульсами напряжения используют генераторы коммутационных импульсов, которые могут быть выполнены на базе колебательных контуров с повышающими импульсными трансформаторами.

Стандартные грозовые импульсы получают путем разряда заряженного высоковольтного конденсатора на резистор; фронт импульса формируют путем заряжения дополнительного конденсатора через дополнительный фронтный резистор. Для получения импульсов напряжением более 250-300 кВ используют многоступенчатые схемы ГИН, в которой несколько конденсаторов заряжаются от зарядного устройства параллельно, а при разряде с помощью искровых промежутков переключаются в последовательное соединение со сложением напряжений на конденсаторах.

11. Наиболее распространенными средствами измерения высоких постоянных напряжений являются шаровые разрядники, электростатические вольтметры и добавочные резисторы.

На высоком переменном напряжении для измерений применяются шаровые разрядники, электростатические вольтметры, емкостные делители напряжений, трансформаторы напряжения с низковольтными вольтметрами и низковольтные вольтметры в первичных обмотках повышающих трансформаторов.

Для измерения импульсных напряжений используют шаровые разрядники и делители напряжения.

12. На изоляцию электрооборудования воздействуют перенапряжения, появляющиеся в результате коммутационных процессов в сети, незапланированного режима сети или из-за разрядов молнии. Эти перенапряжения могут привести к повреждению изоляции.

В соответствии с причинами возникновения различают коммутационные, квазистационарные и атмосферные (грозовые) перенапряжения.

Очень существенную роль в защите от перенапряжений играют заземления, поведение которых при грозовых перенапряжениях характеризуется величиной импульсного сопротивления.

Источником грозовых перенапряжений служат разряды молнии, характеризующиеся числом часов с грозой в году, количеством разрядов молнии на  $1 \text{ км}^2$  за 100 грозовых часов и статистическими характеристиками тока в канале молнии и крутизны тока в канале молнии.

13. Прямые удары молний приводят к перекрытию изоляции линий напряжением 3..35 кВ, в том числе и контактной сети железной дороги. Около половины всех перекрытий контактной сети переменного тока сопровождаются возникновением электрической дуги и отключением фидера.

Величина индуцированного перенапряжения примерно пропорциональна амплитуде тока молнии.

Прямые удары молнии в контактную сеть переменного тока вместе с индуцированными перенапряжениями при 30 грозовых часах в году приводят в среднем к 15 перекрытиям изоляции 100 км контактной сети переменного тока.

14. К длинным линиям относят электрические цепи, в которых необходимо учитывать запаздывание в распространении электромагнитного поля. К цепям с распределенными параметрами относят цепи, в которых необходимо заниматься распределением напряжений и токов внутри отдельных элементов цепи.

Прямое применение законов Кирхгофа для анализа процессов в длинных линиях невозможно из-за того, что в них не учитывается запаздывание в распространении электромагнитного поля. Применение законов Кирхгофа к коротким отрезкам длинных линий приводит к дифференциальным уравнениям, называемым телеграфными уравнениями.

В длинной линии распространяются падающие и отраженные волны напряжений. Грозовые перенапряжения полностью относятся к таким ти-

пам волн.

На конце линии возможно удвоение падающей волны напряжения, а в обмотках трансформаторов на главной изоляции также возможны условия удвоения перенапряжений. Импульсные перенапряжения больше по величине на витках, расположенных вблизи проходного изолятора, с которого приходит волна перенапряжения.

15. Емкостная генерация в линии электропередачи приводит к повышению напряжения на удаленном от генератора ненагруженном конце линии.

В сетях с изолированной нейтралью квазистационарные перенапряжения возникают при однофазных замыканиях на землю. В сетях с компенсированной нейтралью возможно большое смещение нейтрали в нормальном режиме из-за несимметрии отдельных фаз линии.

Гашение электрической дуги приводит к возникновению в сети перенапряжений, определяемых скоростью спада тока при гашении дуги.

При включении и отключении ненагруженных линий, при отключении конденсаторных установок и ненагруженных трансформаторов возникают коммутационные перенапряжения большой величины.

16. Для изоляции электроустановок устанавливают и поддерживают необходимое соотношение между уровнем изоляции и воздействующими на нее напряжениями, называемое координацией изоляции. Обычно принимают для линий электропередачи среднее число перекрытий изоляции линии типовой длины равным 1 раз в 10 лет, для изоляции подстанций показатель надежности принимается равным примерно одному отказу в 50-100 лет.

Для защиты линий и оборудования подстанций от перенапряжений используют искровые промежутки, разрядники и ОПН, тросы и заземления опор на линиях, роговые разрядники, трубчатые разрядники на контактной сети, молниеотводы, конденсаторы для снижения грозовых перенапряжений.

Основные принципы защиты оборудования подстанций сводятся к защите от прямых ударов молнии стержневыми молниеотводами, защите оборудования от волн, приходящих с линии с помощью разрядников или ОПН, и к защите подходов линий от прямых ударов молнии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов. И.М.Богатенков, Г.М.Иманов, В.Е.Кизеветтер и др.; Под ред. Г.С.Кучинского. – СПб: изд. ПЭИПК, 1998. – 700 с.

2. Радченко В.Д. Техника высоких напряжений устройств электриче-

ской тяги. М.: Транспорт, 1975. – 360 с.

3. Егоров В.В. Техника высоких напряжений. Перенапряжения в устройствах электрической тяги. Профилактические испытания изоляции: Учебное пособие для вузов ж-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2004. – 188 с.

4. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техника высоких напряжений. Минск: Высш.школа, 1982. – 367 с.

5. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1976. – 488 с.

6. Техника высоких напряжений /Под ред.М.В.Костенко. М.: Высш.школа, 1973. – 528 с.

7. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

8. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь С.Ю. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

9. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. М.: Энергоатомиздат, 2003.

10. Правила устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 2002.

11. Бабиков М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С. Техника высоких напряжений. М.: ГЭИ, 1963. 671 с.

12. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. /Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгль В. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 554 с.

13. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М: изд-во МЭИ, 2004. – 29 с.

14. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М: Энергоатомиздат, 1987.

15. Колечицкий Е.С. Основы расчета заземляющих устройств. – М: изд-во МЭИ, 2003.