



**Министерство образования и науки РФ  
Рубцовский индустриальный институт  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»**

**О.П. Балашов**

# **Техника высоких напряжений**

Учебное пособие для студентов специальности  
140400 всех форм обучения



Рубцовск 2012

УДК 621.31

Балашов О.П. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для студентов специальности 140400 всех форм обучения /Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2012. 70 с.

В учебном пособии в краткой форме изложены основы электрофизических процессов в газообразных, жидких, твердых и комбинированных диэлектриках, конструкции изоляции линий электропередач и подстанций, изоляция оборудования высокого напряжения (силовых трансформаторов, высоковольтных конденсаторов, кабелей, электрических машин, коммутационных аппаратов), вопросы профилактики изоляции.

Рассмотрены и одобрены  
на заседании кафедры  
электроэнергетики РИИ.  
Протокол № 7 от 29.06.2012

Рецензент: к.п.н., доцент

В.И. Бахмат

© Рубцовский индустриальный институт, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

1 ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ.....	5
2 КОНФИГУРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ .....	7
3 ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ.....	9
3.1 Ионизационные процессы в газе .....	9
3.2 Процесс возникновения лавины электронов.....	13
3.3 Условие самостоятельности разряда .....	16
3.4 Механизм перехода лавинного разряда в стримерный. Закон Пашена	17
3.5 Разряд в неоднородных полях. Эффект полярности.....	20
3.6 Применение барьеров. Барьерный эффект .....	22
3.7 Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции .....	24
3.8 Возникновение коронного разряда. Потери энергии при коронировании.....	27
3.9 Развитие разряда в воздухе по поверхности изоляторов.....	29
3.10 Механизм возникновения разряда вдоль загрязненной поверхности изолятора.....	33
4 ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ.....	34
4.1 Механизм пробоя жидких диэлектриков .....	34
4.2 Механизм влияния влаги и микропримесей на пробой жидких диэлектриков.....	36
4.3 Механизм влияния давления и температуры на пробой жидких диэлектриков.....	37
4.4 Механизм влияния длительности приложенного напряжения на пробой жидких диэлектриков.....	39
4.5 Механизм влияния материала электродов, расстояния между ними и полярности. Барьерный эффект .....	39
5 ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ.....	41
5.1 Механизм пробоя твердой изоляции.....	41
5.2 Возникновение частичных разрядов и их влияние.....	43
6 ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ.....	45
6.1 Высоковольтные изоляторы .....	45
6.2 Изоляция высоковольтных конденсаторов .....	50
6.3 Изоляция трансформаторов .....	51
6.4 Изоляция кабелей.....	52
6.5 Изоляция электрических машин .....	54

7 ПРОФИЛАКТИКА ИЗОЛЯЦИИ.....	55
7.1 Задачи и цели профилактики.....	55
7.2 Метод измерения сопротивления изоляции .....	56
7.3 Метод измерения $\text{tg}\delta$ .....	57
7.4 Методы обнаружения частичных разрядов.....	58
7.5 Метод измерения емкости изоляции.....	60
7.6 Испытание повышенным напряжением.....	61
8 ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ .....	62
8.1 Установки для получения высоких переменных напряжений.....	62
8.2 Установки для получения высоких постоянных напряжений .....	64
8.3 Импульсные испытательные установки .....	68
8.4 Генератор импульсных токов .....	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	70

# 1 ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Надежность работы электроэнергетической системы и сетей определяется надежностью ее элементов: генераторов, трансформаторов, коммутационной аппаратуры, компенсирующих устройств, сетей и другого электрооборудования. В значительной степени решение этой задачи достигается путем надежной работы изоляции электрических систем и оборудования при всех постоянно действующих на нее или кратковременно возникающих напряжениях.

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

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

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

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

**Воздушная (внешняя)** изоляция после пробоя полностью самовосстанавливается, если снимается напряжение или гаснет дуга в месте пробоя. Пробой твердой и комбинированной изоляции - явление необратимое, приводящее к выходу из строя электрооборудования. Жидкая и внутренняя газовая изоляция самовосстанавливается, однако пробой приводит к ухудшению их характеристик. Поэтому состояние внутренней изоляции контролируется во время эксплуатации, для того чтобы выявить развивающиеся в ней дефекты и предотвратить аварийный отказ электрооборудования.

Основными требованиями, предъявляемые к изоляции электрооборудования, являются:

- 1) требуемый ресурс (срок службы) при рабочем напряжении;
- 2) достаточная электрическая прочность при воздействии внутренних и внешних перенапряжений;
- 3) достаточная механическая прочность при всех возможных рабочих и аварийных нагрузках;
- 4) требуемая надежность;
- 5) минимальная стоимость;
- 6) минимальные размеры и масса;

- 7) технологичность изготовления изоляции и всего оборудования в целом;
- 8) простота ремонта;
- 9) безопасность обслуживания;
- 10) экологическая безопасность.

На электрическое оборудование, работающее в электрических сетях (ЭС), воздействуют: рабочее напряжение, внутренние и грозовые перенапряжения. Согласно этому электрооборудование подразделяется на классы напряжения. Класс напряжения совпадает с номинальным линейным напряжением электрической сети, для работы в которой предназначено электроустановка.

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

По ГОСТ 1516.1 - 76 (1999)  $U_{\text{раб.наиб}}$  равно:

$$U_{\text{раб.наиб}} = k_p U_n, \quad (1)$$

где  $k_p$  - кратность рабочего напряжения;

$U_n$  - номинальное напряжение сети.

Таблица 1

Кратность рабочего напряжения

Класс напряжения, кВ	3-20	35-220	330	500-1150
$k_\delta$	1,2	1,15	1,1	1,05

В процессе эксплуатации электрическое оборудование подвергается повышению напряжения сверх рабочего – внутренним или внешним перенапряжениям.

Перенапряжения характеризуются:

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

$$k_\gamma = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}U_{\text{раб.ф.наиб}}};$$

2) длительностью воздействия;

3) формой кривой напряжения;

4) частотой воздействия;

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

Различают следующие виды внутренних перенапряжений: режимные (квазистационарные) и коммутационные. К режимным перенапряжениям относятся перенапряжения на разомкнутом конце односторонне включенной «холостой» линии, резонансные перенапряжения на основной частоте и высших

гармонических, феррорезонанс, параметрический резонанс. Режимные перенапряжения характеризуются невысокой кратностью ( $k_f \leq 1,5 - 2,0$ ) и относительно большой длительностью – от долей секунд до десятков минут.

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

Максимальные значения и длительность перенапряжений зависят от ряда случайных факторов: вида коммутации, характеристик коммутирующего аппарата, фазы начала процесса, мощности подстанции и др.

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

Значения грозовых перенапряжений зависят от интенсивности ударов молнии и характеристик пораженных объектов.

На основании вышеизложенного возникает необходимость в численных оценках электрической прочности изоляции на основе расчетных моделей, отражающих закономерности развития разряда в различных средах.

## 2 КОНФИГУРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Диэлектрики служат для изоляции токоведущих электродов разной полярности друг от друга. Изолируемые электроды (шины распределительных устройств, провода линий электропередач, наружные токоведущие части электрических аппаратов и т. п.) создают электрические поля различной конфигурации.

От формы электрического поля зависит электрическая прочность и пробивное напряжение. Формы электрических полей подразделяются на: **однородные, слабнеоднородные и резконеоднородные**. Однородное поле создают два плоскопараллельных электрода, слабнеоднородное поле возникает в системе электродов шар-шар (рисунок 1) при расстоянии между электродами  $S$  меньше диаметра шара  $D$ , резконеоднородное поле - при электродах стержень-плоскость или стержень-стержень. Степень неоднородности электрического поля между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности  $\hat{E}_f$ , который равен отношению максимальной напряженности электрического поля  $E_{max}$  к средней напряженности  $E_{\text{но}}$  между электродами:

$$\hat{\mathbf{E}}_i = \frac{\mathring{\mathbf{A}}_{\max}}{\mathbf{E}_{\text{нб}}} . \quad (2)$$

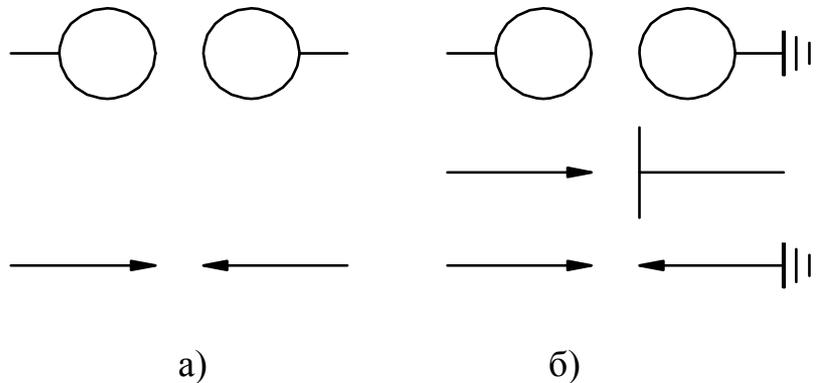


Рисунок 1 - Формы электрических полей: а) - симметричная система электродов; б) - несимметричная система электродов

Средняя напряженность – это отношение напряжения, приложенного к электродам,  $U$ , к расстоянию между электродами,  $S$ :

$$\mathbf{E}_{\text{нб}} = \frac{U}{S} . \quad (3)$$

Максимальная напряженность зависит от приложенного к электродам напряжения, конфигурации, размеров электродов и расстояния между ними. Например, для коаксиальных цилиндров (кабель) (рисунок 2) максимальная напряженность определяется:

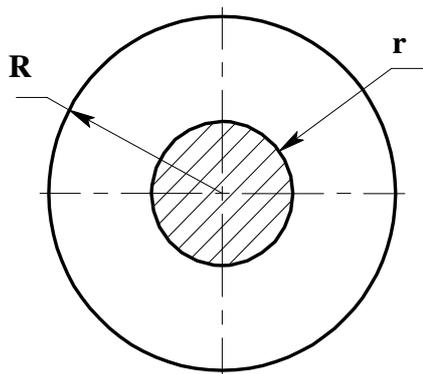


Рисунок 2 - Схема коаксиальных электродов

$$\mathbf{E}_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} , \quad (4)$$

а средняя напряженность:

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{R - r}, \quad (5)$$

где  $U$  — приложенное напряжение, кВ;

$r$  — внешний радиус внутреннего цилиндра (жила кабеля), см;

$R$  — внутренний радиус наружного цилиндра (оплетка кабеля), см.

Подставив формулы (4) и (5) в (2), получаем:

$$\hat{E}_i = \frac{R - r}{r \ln \frac{R}{r}}. \quad (6)$$

Следовательно, коэффициент неоднородности  $\hat{E}_i$  зависит от геометрических размеров электродов. Для однородного поля коэффициент неоднородности  $\hat{E}_i = 1$ , для слабонеоднородного -  $\hat{E}_i \leq 3$ , для резконеоднородного -  $\hat{E}_i > 3$ .

Кроме этого различают **симметричную** и **несимметричную** систему электродов. **Симметричная форма** - электроды имеют одинаковую форму и размеры и отсутствует заземление какого-либо из них (рисунок 1,а). **Несимметричная форма** - электроды имеют отличающуюся конфигурацию, размеры или один из них заземлен (рисунок 1,б). Пробивные напряжения в несимметричной системе электродов ниже, чем в симметричной.

### 3 ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ

#### 3.1 Ионизационные процессы в газе

Рассмотрим процессы ионизации в газе. При отсутствии внешнего электрического поля частицы газа находятся в состоянии хаотического движения, постоянно сталкиваясь с друг другом. Если на единице длины пути частица испытала  $Z$  столкновений, то средняя длина ее свободного пробега  $\lambda$  равна:

$$\lambda = \frac{1}{Z}. \quad (7)$$

Значение  $\lambda$  зависит от концентрации частиц, давления и температуры газа. С увеличением давления и уменьшением температуры  $\lambda$  уменьшается. Частицы газа при хаотичном движении перемещаются беспорядочно. Наличие внешнего электрического поля приводит к возникновению направленного движения заряженных частиц и к появлению в газе электрического тока.

Подвижность частицы в электрическом поле зависит от ее массы: чем больше масса частицы, тем меньше ее подвижность.

При рассмотрении электрофизических процессов будем считать, что электроны являются частицами, и не учитываем их волновые свойства. Если электроны находятся на наименьших стационарных орбитах, то потенциальная энергия атома минимальна. Такое состояние атома является устойчивым и называется **нормальным**. Переход одного или нескольких электронов с нормальных орбит на более удаленные от ядра называется **возбуждением атома**. Энергию, необходимую для возбуждения, атом (молекула) может получить при столкновении с другой частицей или при поглощении коротковолнового излучения (фотовозбуждение). Время пребывания атома в возбужденном состоянии составляет  $\sim 10^{-10}$  с. Возвращение же атома в нормальное состояние может происходить самопроизвольно и сопровождаться излучением фотона.

Если электрон удаляется от ядра, его взаимодействие с ядром уменьшается, и электрон становится **свободным**. Так происходит ионизация атома. В итоге образуются две независимые частицы: электрон и положительный ион. Энергия, поглощенная атомом, называется **энергией ионизации**. Энергия возбуждения и ионизации выражается в электронвольтах (эВ). Минимальные энергии возбуждения и ионизации некоторых содержащихся в воздухе газов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Энергии возбуждения и ионизации газов

Газ	Минимальная энергия, эВ	
	возбуждения	ионизации
N <sub>2</sub>	6,1	15,5
O <sub>2</sub>	9,1	13,6
H <sub>2</sub> O	7,6	12,7

Одновременно с ионизацией атомов и молекул газа происходит процесс взаимной нейтрализации заряженных частиц - **рекомбинация**. При действии двух противоположных факторов - ионизации и рекомбинации - устанавливается равновесное состояние. Это равновесное состояние характеризуется **степенью ионизации газа**, т. е. отношением концентрации ионизованных частиц к общей концентрации частиц. Степень ионизации определяется по формуле:

$$\hat{E}_{\text{иИ}} = \frac{n_{\text{иИ}}}{N_{\Sigma}}, \quad (8)$$

где  $\hat{E}_{\text{иИ}}$  - коэффициент степени ионизации газа;

$n_{\text{иИ}}$  - концентрация ионизованных частиц;

$N_{\Sigma}$  - общая концентрация частиц ( $N_{\Sigma} \approx 10^{22}$  атомов на см<sup>3</sup>).

Газ, в котором значительная часть атомов и молекул ионизирована, называется **плазмой** ( $n_{\text{и\ddot{и}}} \geq 10^{12} \div 10^{14}$  ионов на  $\text{см}^3$ ). Концентрация положительных и отрицательных зарядов в плазме примерно одинакова. Плазма - форма существования вещества при температуре около 5000 К и выше.

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

Различают следующие виды ионизации: **объемная** и **поверхностная**. **Объемная ионизация** - образование заряженных частиц в объеме газа между электродами. **Поверхностная ионизация** - излучение (эмиссия) заряженных частиц с поверхности электродов.

Объемная ионизация делится на:

- 1) ударную ионизацию;
- 2) ступенчатую ионизацию;
- 3) фотоионизацию;
- 4) термоионизацию.

**Ударная ионизация** - это соударение электрона с нейтральным атомом или молекулой. Если к промежутку между электродами в газе приложено напряжение, то заряженные частицы кроме тепловой скорости приобретают под действием электрического поля направленную скорость, которая определяется:

$$\mathbf{V} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{E}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{V}$  - скорость, см /с;

$\mathbf{k}$  - коэффициент пропорциональности, получивший название «подвижность» — скорость дрейфа заряженной частицы в электрическом поле с  $\mathbf{E} = 1 \text{ В /см}$ :

$k_{\text{э\ddot{е}}} \approx 400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  – подвижность электронов;

$k_{\text{и\ddot{и}}} \approx 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  – подвижность ионов;

$\mathbf{E}$  — напряженность внешнего электрического поля, В/см.

Кинетическая энергия частиц может быть больше тепловой энергии и достаточной для осуществления ударной ионизации нейтральных частиц. Тогда условие ионизации может быть записано в виде:

$$\frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{V}^2}{2} \geq \mathbf{W}_{\text{и}}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{m}$  – эффективная масса заряженной частицы, кг ( $\mathbf{m}_{\text{эл}} = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – эффективная масса электрона;  $\mathbf{m}_{\text{прот}} = 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг – эффективная масса протона);

$\mathbf{V}$  — скорость движения заряженной частицы, м/с;

$\mathbf{W}_{\text{и}}$  — энергия ионизации нейтрального атома или молекулы, эВ.

Если скорость электронов значительно больше скорости ионов, то ударная ионизация ионами малоэффективна и определяющей является ударная ионизация электронами.

Условием ударной ионизации электроном является:

$$\frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} \geq W_{\text{и}}, \quad (11)$$

где  $m_1$  - масса электрона;

$V_1$  - скорость электрона;

$W_{\text{и}}$  - энергия ионизации молекулы (атома).

**Ступенчатая ионизация** возникает, когда энергия первого воздействующего на нейтральный атом или молекулу электрона приводит атом только в возбужденное состояние, т. е. энергия электрона недостаточна для ионизации. Воздействие второго электрона на возбужденный атом или молекулу приводит к ионизации. Время между воздействием первого и второго электронов должно быть не более времени нахождения нейтрального атома или молекулы в возбужденном состоянии. Условием ступенчатой ионизации является:

$$\frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_3 \cdot V_3^2}{2} \geq W_{\text{и}}, \quad (12)$$

где  $m_1$  - масса электрона;

$V_1, V_3$  - скорости электронов;

$W_{\text{и}}$  - энергия ионизации молекулы (атома).

Для осуществления **фотоионизации** в газах энергия фотонов должна быть больше энергии ионизации при поглощении фотона нейтральным атомом или молекулой. Этот процесс успешно осуществляется в смеси газов (воздух). При фотоионизации возможна и ступенчатая ионизация.

Условие фотоионизации описывается:

$$h \cdot \nu \geq W_{\text{и}}, \quad (13)$$

где  $h$  - постоянная Планка;

$\nu$  - собственная частота фотона.

**Термоионизация** обусловлена тепловым состоянием газа и может происходить в следующих случаях:

- 1) в результате соударений между атомами и молекулами при высоких температурах;
- 2) в результате теплового взаимодействия при высоких температурах;
- 3) при столкновении электрона с нейтральным атомом или молекулой при высоких температурах.

В газе при тепловом движении происходит диссоциация молекул раньше, чем произойдет ионизация, т. к. энергия диссоциации меньше, чем энергия

ионизации. В таблице 3 в качестве примера приведены энергия диссоциации и ионизации для некоторых газов.

Таблица 3

Энергии диссоциации и ионизации

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

**Поверхностная ионизация** (эмиссия электронов) осуществляется за счет:

1) бомбардировки поверхности катода положительными ионами (рисунок 3,а); условие для выхода электрона с поверхности определяется:

$$\frac{m_{\text{ион}} \cdot V_{\text{ион}}^2}{2} \geq W_{\text{вых}}, \quad (14)$$

где  $m_{\text{ион}}$  - масса иона;

$V_{\text{ион}}$  - скорость иона;

$W_{\text{вых}}$  - энергия выхода электрона.

2) лучистой энергии, облучающей катод (ультрафиолетовый свет, рентген) - фотоэмиссия (рисунок 3,б); при этом условие для выхода электрона с поверхности имеет вид:

$$h \cdot \nu \geq W_{\text{вых}}, \quad (15)$$

где  $h$  - постоянная Планка;

$\nu$  - частота излучения фотона;

$W_{\text{вых}}$  - энергия выхода электрона.

3) нагрева поверхности катода - термоэлектронная эмиссия (рисунок 3,в);

4) энергии внешнего электрического поля - автоэлектронная или холодная эмиссия (рисунок 3,г) возможна при напряженности электрического поля более  $3 \cdot 10^2$  кВ/см.

Для реализации поверхностной ионизации необходимо, чтобы энергия воздействия была больше энергии выхода электрона из катода  $W_{\text{вых}}$ .

### 3.2 Процесс возникновения лавины электронов

При наличии в газе свободного электрона под действием однородного поля и достаточной напряженности электрического поля электрон может ионизировать атом или молекулу газа при столкновении. В результате возникает новый электрон и положительный ион. Этот электрон вместе с начальным ионизируют новые атомы и молекулы, и число свободных электронов непрерывно нарастает. Такой процесс получил название **лавины электронов**.

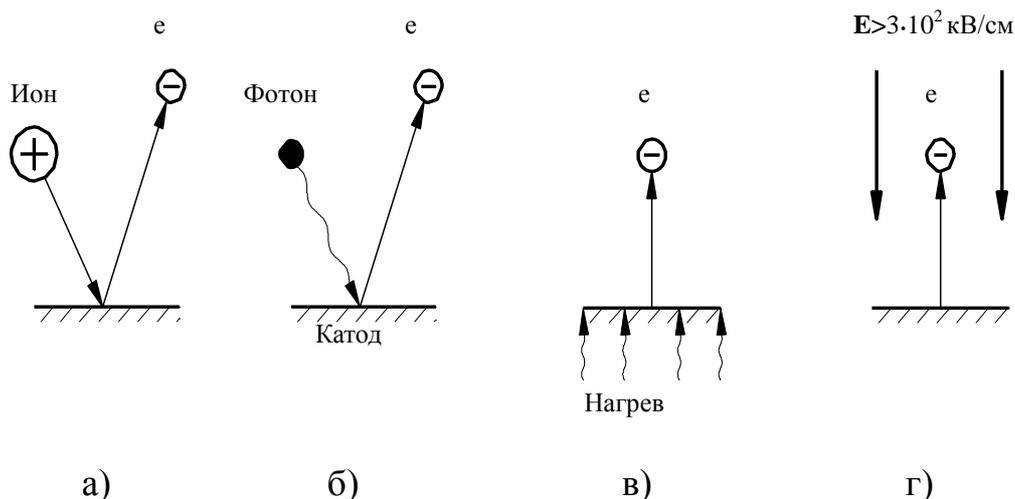


Рисунок 3 - Поверхностная ионизация: а) ионизация ионом, б) ионизация лучистой энергией, в) термоионизация, г) автоэлектронная ионизация

Интенсивность размножения электронов в лавине характеризуется **коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$** , который равен числу ионизаций, производимых электроном на пути в 1 см по направлению действия электрического поля. Другое название коэффициента ударной ионизации - **первый коэффициент Таунсенда**.

В процессе развития лавины с электронами образуются положительные ионы. Так как подвижность ионов значительно меньше, чем электронов, то за время развития лавины они не успевают переместиться в промежутке к катоду. После прохождения лавины электронов в газе остаются положительные, а в электроотрицательных газах и отрицательные ионы, которые могут уменьшить или увеличить внешнее электрическое поле в промежутке. На рисунке 4 представлен механизм развития лавины под действием электрического поля. Напряженность электрического поля на фронте лавины возрастает, в средней части уменьшается, а вблизи катода вновь незначительно увеличивается.

Лавинный процесс описывается формулой, определяющей число электронов в лавине. Если принять, что из катода за счет внешнего ионизатора вырывается  $n_0$  электронов (например,  $n_0 = 1$ ), на расстоянии  $x$  от катода число электронов возросло до  $n$  (рисунок 5), то увеличение числа электронов  $dn$  на пути  $dx$  будет равно:

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx, \quad (16)$$

или

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx. \quad (17)$$

Интегрируя (17) по  $n$  от 1 до  $n$  и по  $x$  от 0 до  $x$ , получаем:

$$\int_1^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha \cdot dx . \quad (18)$$

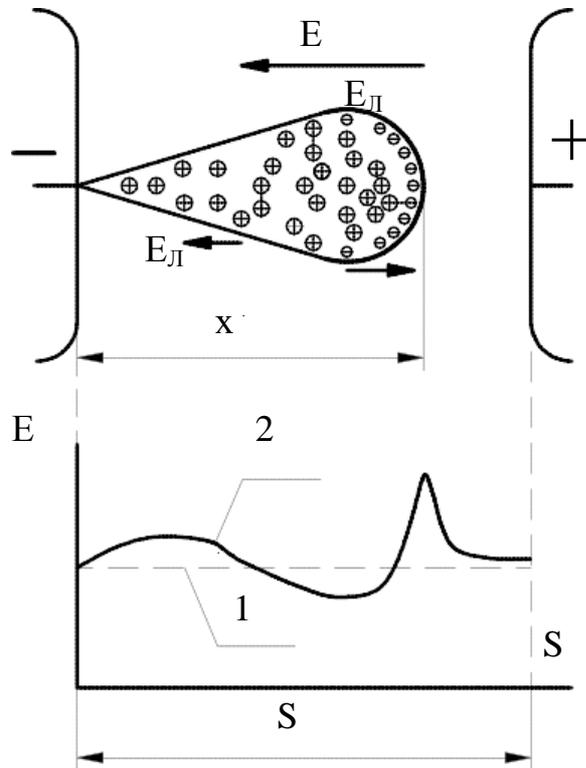


Рисунок 4 – Механизм развития лавины под действием электрического поля: 1 - средняя напряженность без лавины; 2 - результирующая напряженность

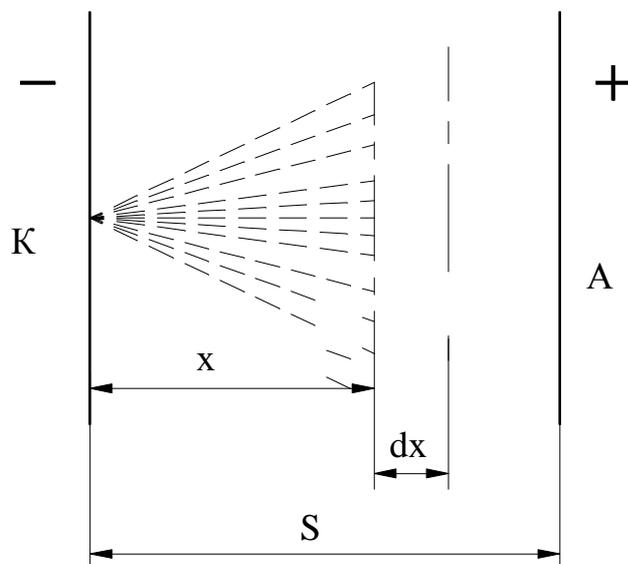


Рисунок 5 - Схема определения числа электронов в лавине

В однородном поле, где коэффициент ударной ионизации  $\alpha = \text{const}$ , будем иметь:

$$\ln n = \alpha \cdot x, \quad (19)$$

или

$$n = e^{\alpha \cdot x}. \quad (20)$$

Таким образом, формула (19) дает значение электронов в лавине без учета их прилипания к нейтральным атомам и молекулам. Явление прилипания характеризуется коэффициентом прилипания  $\eta$ , который зависит от рода газа (электроотрицательный или электроположительный). Тогда число электронов в лавине с учетом прилипания будет равно:

$$n = e^{(\alpha - \eta) \cdot x}. \quad (21)$$

Если  $n_0$  больше 1, то выражение (21) будет иметь вид:

$$n = n_0 \cdot e^{(\alpha - \eta) \cdot x}. \quad (22)$$

### 3.3 Условие самостоятельности разряда

После прохождения первой лавины в промежутке лавинный процесс может возобновиться или затухнуть. Для возобновления лавинного процесса нужен хотя бы один вторичный эффективный электрон. Если этот электрон получается в результате внешнего ионизатора, разряд называется **несамостоятельным**. Если же вторичный эффективный электрон возникает в результате прохождения первичной лавины - разряд называется **самостоятельным**. Разряд из несамостоятельного может перейти в самостоятельный, если увеличить приложенное к электродам напряжение.

При самостоятельной форме разряда лавинный процесс возобновляется, поскольку первичная лавина и последующие создают условие для возобновления процесса. Условиями возобновления разряда являются:

1) оставшиеся после прохождения лавины положительные ионы, двигаясь к катоду, бомбардируют его и вызывают эмиссию электронов из катода;

2) возбужденные атомы и молекулы, образующиеся наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить как к фотоионизации в объеме промежутка, так и к фотоэмиссии электронов из катода. Образующиеся вторичные электроны приводят снова к образованию лавин в разрядном промежутке.

Количество положительных ионов, оставшихся в промежутке после прохождения лавины, равно количеству электронов в лавине (21), исключая начальный электрон, т. е.:

$$n_{\text{E}}^+ = n_0 \cdot e^{(\alpha-\eta) \cdot S} - 1. \quad (23)$$

Электроны, выбитые из катода, не все участвуют в образовании вторичных лавин. Часть электронов рекомбинирует с положительными ионами. Процесс образования вторичных электронов из катода характеризуется коэффициентом вторичной ионизации  $\gamma$  - **второй коэффициент Таунсенда**. Коэффициент  $\gamma$  зависит от материала катода, состава и давления газа и всегда  $\gamma \ll 1$ . Количество вторичных электронов, образованных после прохождения первичной лавины при самостоятельной форме разряда, должно быть не менее:

$$\gamma \cdot (n_0 \cdot e^{(\alpha-\eta) \cdot S} - 1) \geq 1. \quad (24)$$

То есть уравнение (24) есть условие самостоятельности развития разряда в газовом промежутке. Оно показывает, что в результате прохождения первичной лавины необходимо образование одного эффективного электрона, способного зажечь вторичную лавину.

### 3.4 Механизм перехода лавинного разряда в стримерный. Закон Пашена

В процессе развития лавины непрерывно увеличивается число электронов и положительных ионов. С увеличением числа электронов в головке лавины возрастает напряженность на фронте лавины (рисунок 4). На хвосте лавины напряженность понижена. Электроны в головке лавины могут рекомбинировать с ионами. При рекомбинации излучаются фотоны, которые способны вблизи хвоста первичной лавины ионизовать нейтральные молекулы, образовывать вторичные лавины.

Вторичные лавины втягиваются в область положительного объемного заряда, оставленного первичной лавиной. Электроны вторичных лавин смешиваются с положительными ионами первичной лавины и образуют **стример** - область с наибольшей плотностью тока, которая, разогреваясь, начинает светиться. Наибольшая концентрация частиц (плотность тока) образуется вблизи катода. Для фотоионизации в объеме газа энергия фотонов должна быть больше энергии ионизации. Этот процесс успешно осуществляется в смесях газов, содержащих компоненты с относительно низкой энергией ионизации (в том числе и в воздухе). Бомбардировка катода положительными ионами эффективна при низких давлениях газа.

Критерием перехода лавинного разряда в стримерный является критическое число электронов в лавине. Так, при числе электронов  $n_{\text{кр}} \geq 10^7 - 10^9$  лавина переходит в стример. Механизм образования стримера приведен на рисунке 6.

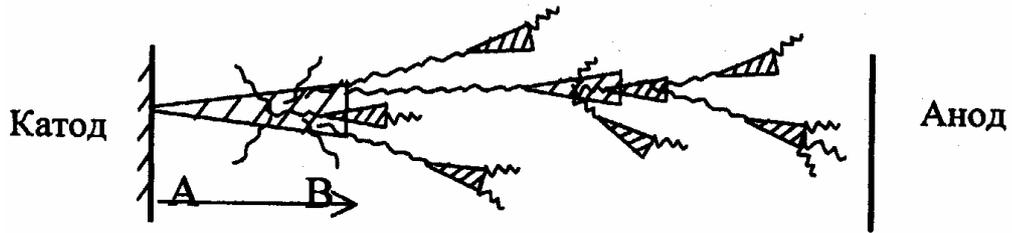


Рисунок 6 – Образование стримера

Выполнение условия самостоятельности разряда (24) в однородном поле означает пробой всего промежутка. Приравняв  $\eta=0$  и выражение (24) к единице, получаем:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot S} - 1) = 1, \quad (25)$$

или

$$e^{\alpha \cdot S} = 1 + \frac{1}{\gamma}. \quad (26)$$

С учетом всех преобразований получаем:

$$\alpha = \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{S}. \quad (27)$$

$$\alpha = \hat{A}_0 \hat{D} \hat{a}^{-\frac{\hat{A}_0 D}{\hat{A}}}, \quad (28)$$

где  $\mathbf{P}$  - давление газа;

$\mathbf{E}$  - напряженность электрического поля;

$\mathbf{A}_0$  - коэффициент, зависящий от состава газа.

$$\hat{A}_0 = \frac{\pi \cdot r^2}{k \cdot T}, \quad (29)$$

где  $\mathbf{r}$  - радиус молекул;

$\mathbf{k}$  - постоянная Больцмана;

$\mathbf{T}$  - температура в градусах Кельвина.

$\mathbf{V}_0$  - коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа.

$$\hat{A}_0 = \hat{A}_0 \cdot U_{\hat{E}}, \quad (30)$$

где  $\mathbf{U}_{\hat{E}}$  - потенциал ионизации газа.

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \dot{A}_0 \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{S} \cdot e^{-\frac{B_0 P}{E}}, \quad (31)$$

и, подставив  $E = \frac{U}{S}$ , имеем:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \dot{A}_0 \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{S} \cdot e^{-\frac{B_0 P \cdot S}{U}}.$$

Относительно  $U_{пр}$  получаем формулу, которая носит название **закон Пашена**:

$$U_{пр} = \frac{B_0 \cdot P \cdot S}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}. \quad (32)$$

Из выражения (32) видно, что при неизменной температуре разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления  $P$  на расстояние между электродами  $S$ , т. е.

$$U_{пр} = f(P \cdot S). \quad (33)$$

Графически закономерность может быть представлена на рисунке 7.

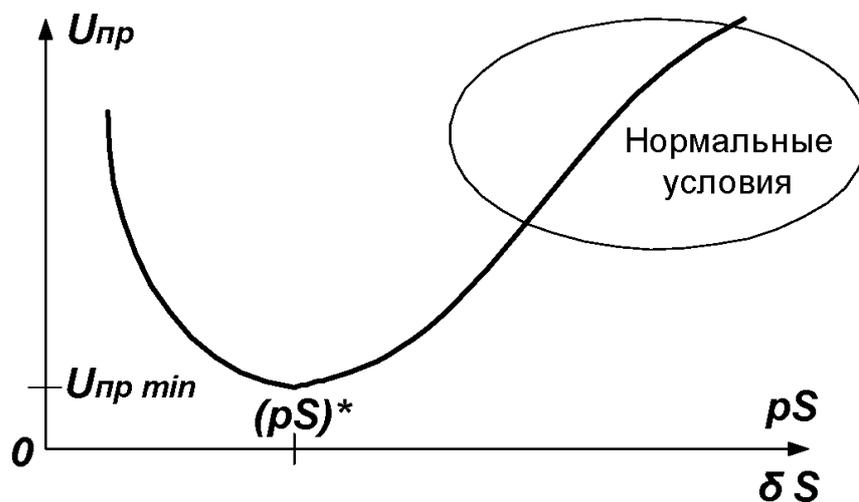


Рисунок 7 - Графическое отображение закона Пашена

Исходя из физических явлений рассматриваемый процесс можно объяснить следующим образом. При  $S = \text{const}$  увеличение давления больше минимального значения приводит к увеличению числа столкновений электронов с нейтральными атомами и молекулами и к уменьшению его

энергии, накапливаемой на длине свободного пробега. Следовательно, для возникновения ударной ионизации необходимо увеличение напряжения  $U_{\text{пр}}$ . С другой стороны, при давлениях меньших, чем соответствующее минимальному значению, увеличивается длина свободного пробега и накапливаемая электроном энергия, но уменьшается количество столкновений и вероятность ударной ионизации. Для ее увеличения необходимо, чтобы большее число столкновений заканчивалось ионизацией. Для этого необходимо увеличивать  $U_{\text{пр}}$ .

Закон Пашена в виде формулы (32) справедлив при нормальной температуре. Изменение температуры действует обратно изменению давления и должно учитываться при расчетах. В общем виде с учетом изменения температуры закон Пашена запишется:

$$U_{\text{пр}} = f\left(\frac{P \cdot S}{T}\right), \quad (34)$$

или

$$U_{\text{пр}} = f(\delta \cdot S), \quad (35)$$

где

$$\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,386 \frac{P}{T}, \quad (36)$$

$T$  - температура в градусах Кельвина.

Тогда:

$$U_{\text{пр д}} = U_{\text{пр р}} \cdot \delta, \quad (37)$$

где  $U_{\text{пр д}}$  - пробивное напряжение, приведенное к действительным условиям измерения;

$U_{\text{пр р}}$  - пробивное напряжение, полученное при расчете по формуле Пашена.

Согласно закону Пашена могут быть предложены способы повышения пробивного напряжения газов:

- 1) увеличение давления больше атмосферного;
- 2) уменьшение давления до значений меньших, чем давление, соответствующее минимуму, вплоть до вакуума.

### 3.5 Разряд в неоднородных полях. Эффект полярности

Основные закономерности развития разряда в любых резконеоднородных полях ( $K_{\text{н}} > 4$ ) практически одинаковы. При некотором начальном напряжении  $U_{\text{н}}$  в промежутке возникает самостоятельный разряд в лавинной форме, т.к. вблизи стержня имеется область с напряженностью, превышающей значение, соответствующее возникновению самостоятельной формы разряда. Разряд локализуется в этой области, а вторичные лавины поддерживаются либо за счет фотоионизации из объема газа (при положительной полярности стержня), либо

за счет фотоэмиссии или автоэлектронной (холодной) эмиссии с катода (при отрицательной полярности стержня). Такой разряд называется **коронным разрядом** в лавинной форме. Значение напряжения и напряженности поля на электроде при возникновении коронного разряда зависит от степени неоднородности поля. С увеличением степени неоднородности напряженность на электроде-стержне увеличивается, а напряжение возникновения короны уменьшается.

При увеличении напряжения свыше  $U_H$ , когда количество электронов в лавине возрастает, она переходит в плазменное состояние и в промежутке возникает стример. Если в однородном поле возникший стример пересекает весь межэлектродный промежуток, то в резконеоднородном поле в зависимости от величины напряжения стример, пройдя некоторое расстояние, может остановиться. При этом плазма его распадается, но вблизи острия возникают новые стримеры, которые также останавливаются и их плазма распадается.

Такое состояние разряда устойчивое, т.к. выполняется условие самостоятельности разряда. Случай, когда стримеры не достигают противоположного электрода, получил название коронного разряда в стримерной форме.

Для пробоя всего межэлектродного промежутка необходимо еще увеличить напряжение. Тогда образуется канал, который продвигается от электрода с повышенной напряженностью (острие) к противоположному электроду. При пересечении искровым каналом всего промежутка он преобразуется в электрическую дугу, что означает завершение пробоя. В резконеоднородных полях напряжение пробоя всегда больше напряжения возникновения коронного разряда в любой форме.

В слабонеровномерных полях коронное и разрядное напряжения практически совпадают друг с другом. В сильнонеровномерном поле коронное напряжение намного ниже разрядного.

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

сравнительно малой величине разрядного напряжения.

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

При большом числе начальных лавин у катода плазменный канал представляет собой более или менее однородный слой с радиусом кривизны большим, чем у острия. Электрическое поле несколько выравнивается, и напряженность во внешней области уменьшается.

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

Развитие стримера при отрицательном острие происходит с большими трудностями. Разрядное напряжение при отрицательной полярности острия больше, чем при положительной полярности (в 2–2,5 раза).

### **3.6 Применение барьеров. Барьерный эффект**

Существенное влияние объемного заряда на развитие разряда в промежутке с резконеровным полем используется на практике для увеличения разрядных напряжений изоляционных промежутков. Это увеличение достигается помещением в промежуток барьеров из твердого диэлектрика, например: электрокартон, гетинакс и др. При положительном острие положительные ионы оседают на барьер и растекаются по его поверхности тем равномернее, чем дальше от острия расположен барьер. Это приводит к более равномерному распределению напряженности в промежутке между барьером и плоскостью (рисунок 8) и к значительному увеличению разрядного напряжения.

При отрицательной полярности стержня электроны, двигаясь от острия, попадают на барьер, теряют скорость, и большинство из них вместе с атомами кислорода становятся отрицательными ионами. На барьере появляется отрицательный заряд, увеличивающий напряженность поля не только между положительным объемным зарядом у острия и барьером, но и во внешнем пространстве (рисунок 9). Поэтому при отрицательной полярности острия увеличение разрядного напряжения в промежутке при наличии барьера будет незначительным. При расположении барьера в средней части промежутка разрядные напряжения отрицательной и положительной полярностях близки.

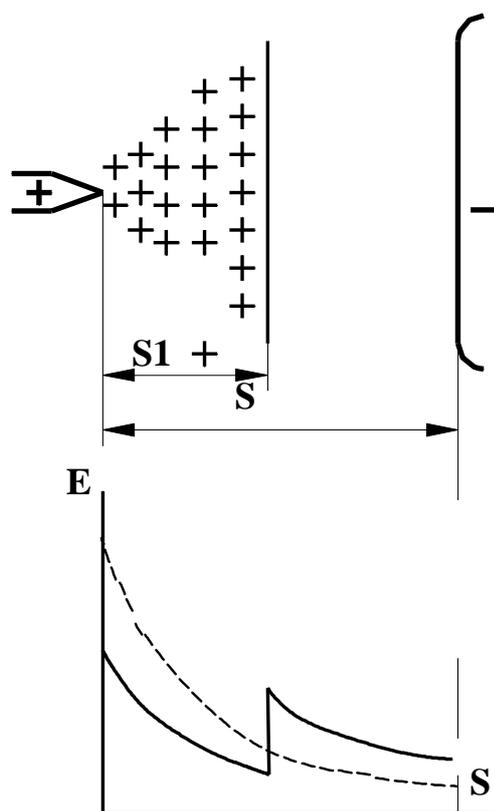


Рисунок 8 - Распределение напряженности поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера и положительной полярности стержня

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

Согласно этому, барьеры в промежутке устанавливаются на оптимальном расстоянии от острия, при котором разрядные напряжения максимальны (25-30 % от длины промежутка между электродами).

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

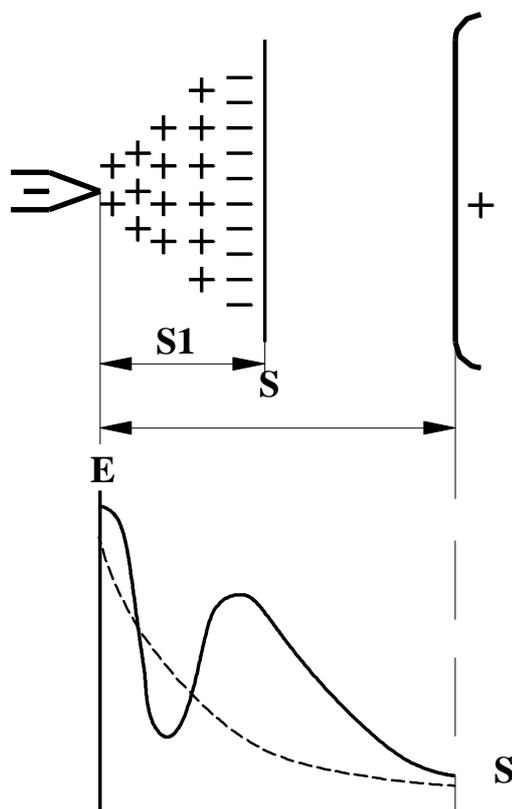


Рисунок 9 - Распределение напряженности поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера и отрицательной полярности

### 3.7 Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции

При кратковременных импульсах значение разрядного напряжения воздушных промежутков зависит от продолжительности воздействия. Если к промежутку приложено напряжение, достаточное для пробоя, то для развития и завершения разряда в промежутке необходимо определенное время  $t_p$ , называемое временем разряда (рисунок 10).

Развитие самостоятельного разряда начинается с появления в промежутке эффективного начального электрона, что является случайным событием. Время ожидания эффективного электрона  $t_c$  подвержено разбросу и называется **статистическим временем запаздывания разряда**. Это первая составляющая времени разряда. Другой составляющей, имеющей также статистический характер, является время формирования разряда  $t_\phi$ , т.е. время от момента появления начального электрона до завершения пробоя промежутка. Время  $t_c + t_\phi = t_z$  называют временем запаздывания развития разряда. При достаточно большой длительности фронта импульса имеет значение  $t_0$ , представляющее собой время подъема напряжения до значения  $U_H$ . В общем случае время разряда определяется как

$$t_p = t_0 + t_c + t_\phi . \quad (38)$$

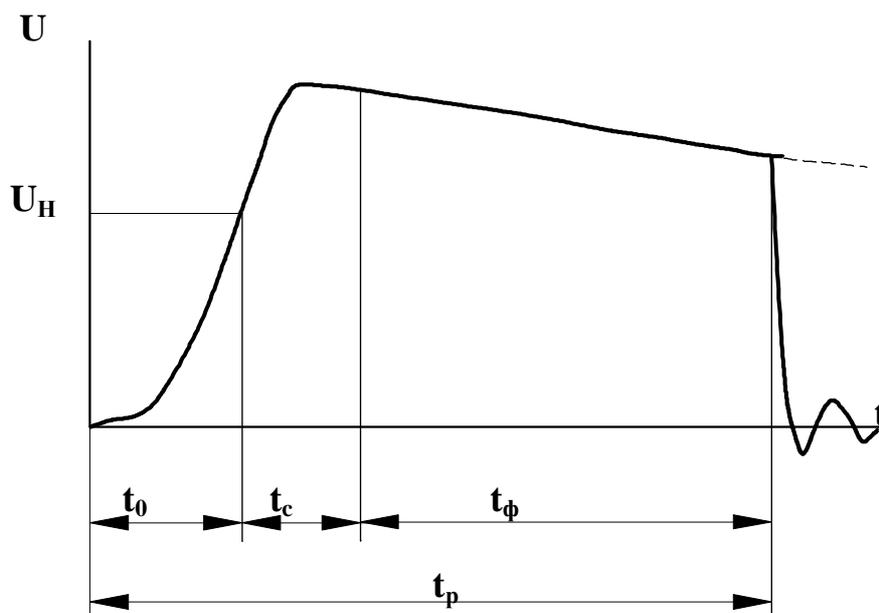


Рисунок 10 - Временная структура развития разряда на импульсном напряжении

Составляющие времени разряда  $t_c$  и  $t_\phi$  зависят от значения напряжения на промежутке. При увеличении напряжения повышается вероятность того, что появляющиеся в промежутке электроны станут эффективными, и  $t_c$  уменьшается. Сокращается также и  $t_\phi$ , поскольку при большем напряжении возрастает интенсивность разрядных процессов и скорость продвижения канала разряда в промежутке. Поэтому чем выше разрядное напряжение, тем меньше время разряда.

Зависимость максимального напряжения разряда от времени действия импульса называется вольт-секундной характеристикой изоляции. С целью унификации испытаний и возможности сопоставления изоляционных конструкций установлен стандартный грозовой импульс с длительностью фронта (возрастания напряжения)  $\tau_\phi = 1,2 \pm 0,4$  мкс и длительностью импульса  $\tau_H = 50 \pm 10$  мкс и обозначается 1,2/50 мкс (рисунок 11).

Вид вольт-секундной характеристики зависит от степени неоднородности электрического поля в промежутке. Для промежутков с однородным или слабонеоднородным полем вольт-секундная характеристика слабо зависит от  $t_p$  (рисунок 12, кривая 1), и только при временах разряда порядка 1 мкс и меньше разрядное напряжение увеличивается. Это обусловлено тем, что разряд в таких промежутках формируется за малое время при напряжении, равном начальному значению, и отсутствует корона.

Вольт-секундные характеристики промежутков с резконеоднородным полем (рисунок 12, кривая 2) имеют достаточно большую крутизну, поскольку в таких промежутках время формирования разряда сильно зависит от значения приложенного напряжения. Для таких промежутков при грозowych импульсах характерны большие разрядные напряжения  $U_p$ , чем при переменном напряжении промышленной частоты 50 Гц. Отношение

$$\hat{E}_{\text{нн}} = \frac{U_{\text{Д}}}{U_{\text{I}}}$$

называется коэффициентом импульса.

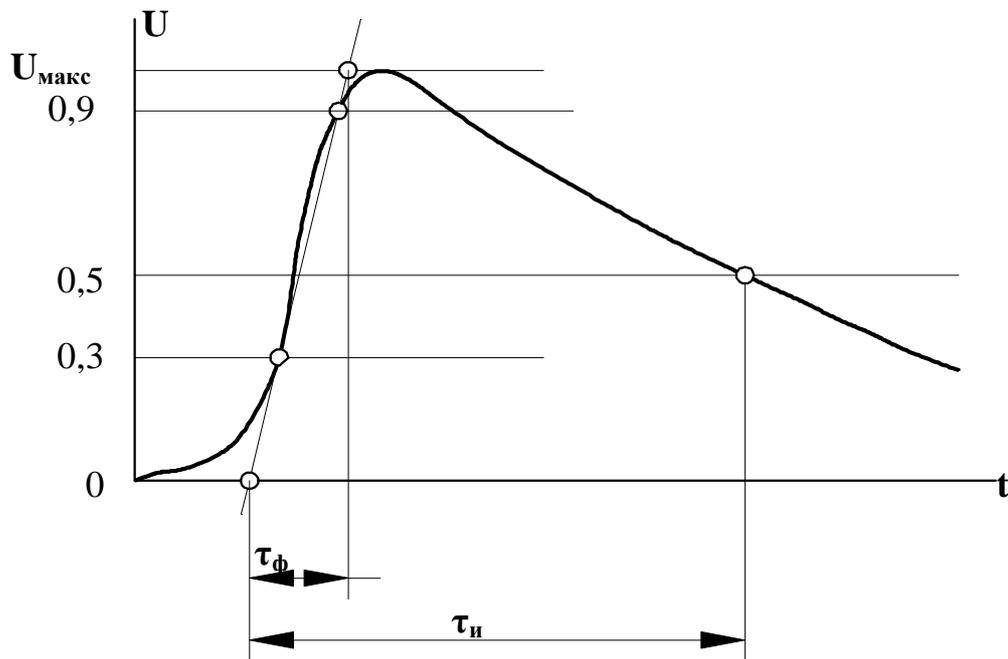


Рисунок 11 - Определение параметров импульса напряжения

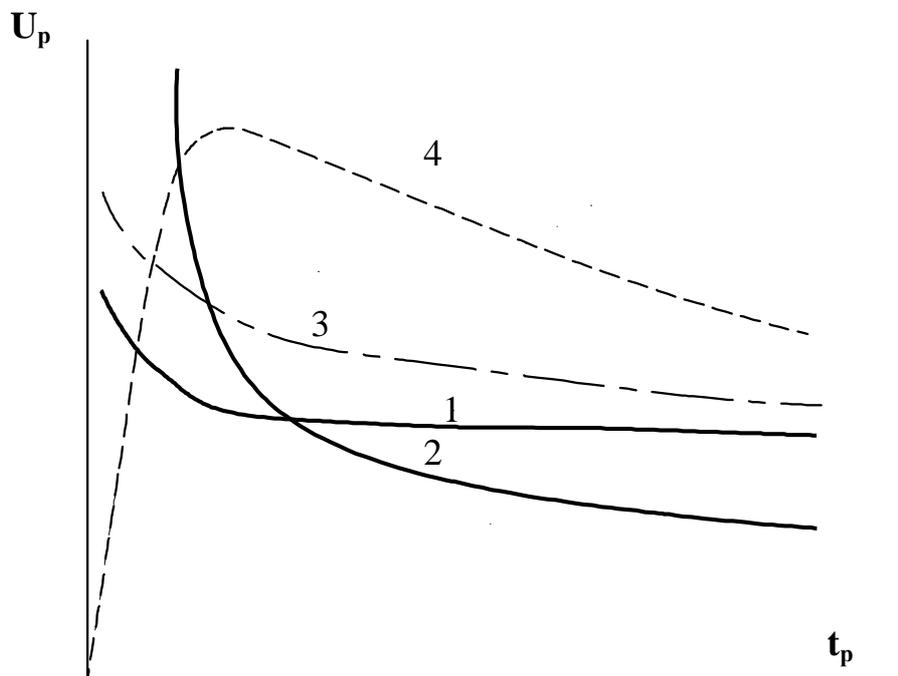


Рисунок 12 - ВСХ защитных разрядников и изоляции: 1 - ВСХ вентильного разрядника (однородное поле); 2 - ВСХ трубчатого разрядника (резконеоднородное поле); 3 - ВСХ защищаемого объекта; 4 - импульс напряжения

Промежутки с однородным и слабонеоднородным полями имеют коэффициент импульса  $\hat{E}_{\text{нп}} = 1$  практически во всем диапазоне времен разряда.

Вольт-секундные характеристики широко используются для координации изоляции высоковольтного оборудования, т. е. для защиты от воздействия грозových и коммутационных перенапряжений. Для этого параллельно защищаемому объекту включается аппарат защиты (например, вентильный разрядник) с пологой ВСХ. Надежная защита будет обеспечиваться, если ВСХ разрядника (рисунок 12, кривая 1) лежит ниже ВСХ защищаемого оборудования (кривая 3) во всем диапазоне времени воздействующего напряжения.

### **3.8 Возникновение коронного разряда. Потери энергии при коронировании**

Коронный разряд - это самостоятельный разряд, при котором ударная ионизация электронами имеет место не на всей длине промежутка, а лишь в его части у электродов. Коронный разряд может иметь лавинную и стримерную форму. Пробой коронирующего промежутка происходит при напряжении большем начального.

Возникновение короны рассматривается ввиду значительных потерь энергии при коронировании ЛЭП. Например, на линиях сверхвысокого напряжения потери энергии при коронировании проводов ЛЭП в плохую погоду составляют 100-200 кВт на километр линии и более. Продукты ионизации воздуха разрушительно действуют на изоляцию и металлическую арматуру. Коронный разряд также является источником акустического шума и высокочастотного электромагнитного излучения, которое создает помехи радио- и телеприему.

При коронном разряде происходит ионизация воздуха и у поверхности провода образуется объемный заряд того же знака, что и полярность напряжения на проводе. Под действием сил электрического поля ионы, составляющие объемный заряд, движутся от провода. Для их передвижения необходимы затраты энергии, которые и определяют в основном потери энергии на корону, поскольку затраты энергии на ионизацию воздуха значительно меньше.

На постоянном напряжении различают **униполярную** и **биполярную** корону. Если коронирует один провод - **униполярная корона**. При униполярной короне генерируемые короной заряды имеют тот же знак, что и коронирующий провод. Под действием электрического поля они устремляются к земле, где происходит их нейтрализация. При биполярной короне объемные заряды проводов различной полярности движутся навстречу друг другу. При встрече происходит рекомбинация ионов разных знаков. Часть ионов проникает в пространство вблизи противоположного провода, что приводит к усилению интенсивности коронирования. Это увеличивает потери на корону.

При переменном напряжении коронирование проводов более интенсивное,

чем при постоянном напряжении, поэтому потери энергии на корону существенно больше. Влияние на её формирование оказывают погодные условия, начальное напряжение, потери энергии, радиопомехи, шум.

При проектировании линий электропередач пользуются расчетными зависимостями потерь энергии при коронировании.

Формулой для расчета потерь на корону на переменном напряжении является эмпирическая формула Пика для одиночного провода:

$$\mathbf{D} = \frac{24,1}{\delta} (\mathbf{f} + 25) \sqrt{\frac{\mathbf{r}_0}{\mathbf{S}}} (\mathbf{U}_\delta - \mathbf{U}_\hat{\mathbf{e}})^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км}\cdot\text{фаза}, \quad (39)$$

где  $\delta$  – относительная плотность воздуха;

$\mathbf{f}$  – частота, Гц;

$\mathbf{r}_0$  – радиус одиночного провода, см;

$\mathbf{S}$  – расстояние между проводами, см;

$\mathbf{U}_\Phi$  – действующее значение фазного напряжения, кВ;

$\mathbf{U}_\mathbf{k}$  – напряжение возникновения короны, кВ.

Напряжение возникновения короны определяется:

$$\mathbf{U}_\hat{\mathbf{e}} = 21,2 \cdot \delta \cdot \ln \frac{\mathbf{S}}{\mathbf{r}_0} \cdot \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2, \text{ кВ} \quad (40)$$

где  $\mathbf{m}_1$  – коэффициент гладкости провода;

$\mathbf{m}_2$  – коэффициент погоды.

Для идеально гладкого провода  $\mathbf{m}_1 = 1$ , для реального витого провода  $\mathbf{m}_1 = 0,85 \div 0,92$  (зависит от конфигурации провода). Для практических расчетов принимается  $\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}_2 = 0,8$  - при плохой погоде.

На линиях электропередачи сверхвысокого напряжения используют расщепленные провода в фазах. Для определения потерь при коронировании для расщепленных проводов используют формулу Майра:

$$\mathbf{D} = \hat{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{r}_0^2 \cdot \mathbf{E}_\hat{\mathbf{e}} (\mathbf{A}_\hat{\mathbf{e}} - \mathbf{A}_\hat{\mathbf{e}}) \cdot \left( 2,3 \lg \frac{1350 \mathbf{A}_\hat{\mathbf{e}}}{\mathbf{f} \cdot \mathbf{r}_0} - 1 \right) \cdot 10^{-5}, \quad (41)$$

где  $\mathbf{n}$  – число проводов в фазе;

$\mathbf{f}$  – частота, Гц;

$\mathbf{r}_0$  – радиус одиночного провода, см;

$\mathbf{E}_\mathbf{k}$  – напряженность возникновения короны, кВ/с

$\mathbf{E}_\mathbf{s}$  – эквивалентная напряженность, кВ/см;

$\mathbf{k}$  – коэффициент погоды.

Эквивалентная напряженность:

$$\mathbf{A}_\hat{\mathbf{e}} = \frac{\mathbf{A}_{\text{iaen}} + \mathbf{A}_{\text{no}}}{2}. \quad (42)$$

Средняя напряженность для расщепленного провода:

$$\dot{A}_{\bar{n}\bar{o}} = \frac{U_{\bar{n}\bar{o}}}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_0 \cdot \ln \frac{S}{r_{\bar{y}\bar{e}\bar{a}}}}. \quad (43)$$

Максимальная напряженность:

$$\dot{A}_{\bar{i}\bar{a}\bar{e}\bar{n}} = k_{\bar{o}} \cdot \dot{A}_{\bar{n}\bar{o}}, \quad (44)$$

где

$$k_{\bar{o}} = 1 + (\mathbf{n} - 1) \cdot \frac{r_{\bar{y}\bar{e}\bar{a}}}{r_{\bar{o}}}, \quad (45)$$

$r_{\bar{y}\bar{e}\bar{a}} = \sqrt[n]{\mathbf{n} \cdot r_0 \cdot r_{\bar{o}}^{n-1}}$  - эквивалентный радиус одиночного провода, имеющего

ту же емкость, что и расщепленная фаза;

$r_p$  - радиус расщепления фазы.

Недостаток формулы заключается в том, что не учитываются погодные условия. Для средней полосы европейской части России и Западной Сибири расчет потерь на корону для 3-фазных линий электропередач сверхвысокого напряжения производят по формуле Л. Егоровой и Н. Тиходеева, которая имеет вид:

$$\mathfrak{D} = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot U_{\bar{E}}^2 \cdot \exp \left[ 8,7 \cdot \left( \frac{U_{\bar{I}}}{U_{\bar{E}}} - 0,53 \right) \right] \cdot 10^{-5}, \quad (46)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение фазового напряжения, кВ.

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

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

### 3.9 Развитие разряда в воздухе по поверхности изоляторов

Рассмотрим, как происходит развитие разряда в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика (например, изолятора). В конструкции (рисунок 13) силовые линии электрического поля параллельны поверхности диэлектрика и поле однородно. На рисунке 14 поле неоднородно и тангенциальная составляющая напряженности поля на поверхности диэлектрика  $E_{\tau}$  преобладает над нормальной составляющей  $E_n$ , в отличие от

рисунка 15, где поле также неоднородно, но преобладает нормальная составляющая. Первая конструкция в реальных условиях встречается редко, но удобна при выявлении влияния характеристик диэлектрика на возникновение разряда, вторая и третья конструкции встречаются в опорных и проходных изоляторах.

Таблица 4

Продолжительность групп погоды за год

Группа погоды	Продолжительность групп погоды за год (час)	Продолжительность групп погоды за год (%)
Хорошая погода	7120	81,3
Сухой снег	800	9,1
Дождь	500	5,7
Изморозь	340	3,9
Сумма	8760	100

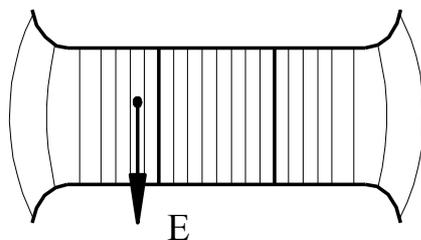


Рисунок 13 - Конструкция воздушного промежутка с твердым диэлектриком при однородном поле

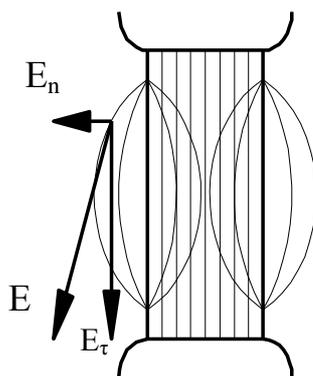


Рисунок 14 - Конструкция воздушного промежутка с твердым диэлектриком при неоднородном поле ( $E_\tau > E_n$ )

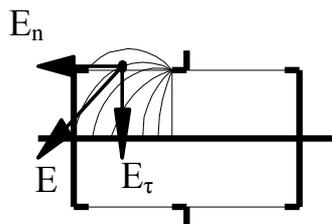


Рисунок 15 - Конструкция воздушного промежутка с твердым диэлектриком при неоднородном поле ( $E_{\tau} < E_n$ )

Согласно рисунку 13 электрическая прочность промежутка с диэлектриком меньше, чем воздушного промежутка. Это связано с наличием влаги из окружающего воздуха на поверхности диэлектрика, а также с микроразорами между твердым диэлектриком и электродом. Поверхность всех тел во влажном воздухе покрыта тончайшей пленкой воды. Ионы, образующиеся в этой пленке под действием электрического поля, перемещаются к электродам. Поле вблизи электродов усиливается, а в середине промежутка ослабляется. Усиление поля у электродов приводит к снижению электрической прочности промежутка. Это снижение тем больше, чем гигроскопичнее диэлектрик.

Так, стекло является более гигроскопичным материалом, чем глазурованный фарфор, поэтому напряжение перекрытия вдоль поверхности стекла ниже, чем вдоль фарфора.

Уменьшение напряжения перекрытия изолятора при наличии микроразора между диэлектриком и электродом или микротрещины на поверхности диэлектрика связано с увеличением в них напряженности поля, так как существует различие диэлектрических проницаемостей воздуха и твердого диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика в 3-4 раза больше, чем воздуха. Увеличение напряженности поля в микроразорах приводит к возникновению ионизационных процессов. Ионы и электроны, попадая в основной промежуток, создают местное усиление поля, приводящее к уменьшению напряжения перекрытия.

Для увеличения разрядного напряжения промежутка с твердым диэлектриком следует использовать малогигроскопичные материалы или создать покрытия, защищающие диэлектрик от контакта с парами воды (например, глазуровка поверхности фарфора), а также обеспечить без микроразоров сопряжение тела изолятора с металлической арматурой.

В изоляционной конструкции на рисунке 14 поле неоднородное, следовательно, разрядное напряжение меньше, чем в однородном поле. Влияние гигроскопичности диэлектрика и микроразоров такое же, как и в предыдущей конструкции, но оно слабее выражено. При большой неоднородности поля в этой изоляционной конструкции, как и в воздушном промежутке, возникает коронный разряд. Наибольшую опасность коронный разряд представляет для полимерной изоляции, особенно если он имеет стримерную форму, так как соприкосновение его с поверхностью диэлектрика может приводить к

термическому разложению диэлектрика и образованию обугленного следа с повышенной проводимостью. Длина этого следа со временем возрастает, что приводит к перекрытию изолятора с потерей им электрической прочности.

Большая нормальная составляющая электрического поля (рисунок 15) способствует сближению канала стримера с поверхностью диэлектрика, что повышает вероятность его повреждения. Электрическая прочность этой конструкции еще меньше, чем конструкции на рисунке 14. Каналы стримеров, развивающихся вдоль поверхности диэлектрика, имеют большую емкость по отношению к внутреннему (противоположному) электроду. Поэтому через стримерные каналы проходит сравнительно большой ток. При определенном значении напряжения ток возрастает настолько, что температура стримерных каналов становится достаточной для термической ионизации. Термически ионизированный канал разряда, развивающегося вдоль диэлектрика, на поверхности которого нормальная составляющая напряженности поля превышает тангенциальную составляющую, называют **каналом скользящего разряда**.

Проводимость канала скользящего разряда значительно больше проводимости канала стримера. Поэтому падение напряжения в канале скользящего разряда меньше, а на непокрытой части промежутка больше, чем в каналах стримера. Увеличение напряжения приводит к удлинению канала скользящего разряда и полному перекрытию промежутка.

Длина канала зависит от его проводимости и значения тока в нем. Ток зависит от напряжения между электродами, изменения напряжения и емкости канала стримера относительно противоположного электрода. Зависимость этих параметров представлено в эмпирической формуле Теплера, согласно которой длина канала скользящего разряда равна:

$$l_{\text{нэ}} = \chi_1 \cdot \tilde{N}^2 \cdot U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad (47)$$

где  $\chi_1$  - коэффициент, определяемый опытным путем;

$C$  - удельная поверхностная емкость (емкость поверхности диэлектрика, по которой развивается разряд, относительно противоположного электрода);

$U$  - приложенное напряжение.

При подстановке вместо  $l_{\text{нэ}}$  расстояния между электродами по поверхности диэлектрика  $L$  можно определить значение напряжения  $U_p$ , необходимого для перекрытия изолятора. Принимаем  $\tilde{N} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$ , где  $d$  - толщина диэлектрика, а площадь  $S$  принять равной  $1 \text{ см}^2$  и считать значение  $\frac{dU}{dt}$  постоянным, что в первом приближении соответствует постоянству частоты приложенного напряжения. Из формулы (47) получим выражение для нахождения разрядного напряжения:

$$U_{\text{в}} = \chi \cdot L^{0,2} \left( \frac{d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4}, \quad (48)$$

которое называется **формула Теплера**.

Согласно выражению (48) рост длины изолятора дает относительно малое повышение разрядного напряжения. Поэтому для увеличения разрядных напряжений проходных изоляторов уменьшают удельную поверхностную емкость путем увеличения диаметра изолятора у фланца, с которого можно ожидать развития разряда. Используется также нанесение у фланца полупроводящего покрытия, что способствует выравниванию распределения напряжения по поверхности изолятора и приводит к увеличению разрядных напряжений.

### **3.10 Механизм возникновения разряда вдоль загрязненной поверхности изолятора**

В условиях эксплуатации поверхности изоляторов всегда загрязняются. Сухие загрязнения, имеющие высокое сопротивление и не влияющие на распределение напряжения по поверхности изолятора, не снижают его разрядного напряжения. Увлажнение слоя загрязнения приводит к уменьшению его сопротивления, изменению распределения напряжения по поверхности изолятора и в результате - к снижению разрядного напряжения.

Механизмы перекрытия изолятора под дождем и при загрязненной и увлажненной поверхности сходны. Под действием приложенного к изолятору напряжения по увлажненному слою загрязнения проходит ток утечки, нагревающий его. Так как загрязнение распределено по поверхности изолятора неравномерно и плотность тока утечки неодинакова на отдельных участках изолятора из-за сложной конфигурации его поверхности, то нагревание слоя загрязнения происходит неравномерно. На тех участках изолятора, где плотность тока наибольшая, происходит интенсивное испарение воды с образованием подсушенных участков с повышенным сопротивлением. Это приводит к перераспределению напряжения по поверхности изолятора. Почти все напряжение, воздействующее на изоляцию, оказывается приложенным к этим участкам. В результате они перекрываются искровыми каналами, называемыми **частичными перемежающимися дугами**. Так как сопротивление искрового канала меньше сопротивления подсушенного участка поверхности изолятора, то ток утечки возрастает. Увеличение тока утечки приводит к дальнейшему подсушиванию слоя и к возрастанию его сопротивления.

Интенсивное подсушивание поверхности изолятора приводит к удлинению дуг, к снижению тока утечки, а увеличение их длины к росту сопротивления. Если же будет происходить уменьшение тока утечки, то дуги погаснут, и, наоборот, при росте тока утечки частичные дуги будут удлиняться и перекроют весь изолятор.

Ток утечки определяется:

$$I_{\delta} = \frac{U}{R_{\delta}}, \quad (49)$$

где  $I_{\delta}$  - ток утечки по изолятору;  
 $R_{\delta}$  - сопротивление утечки по поверхности изолятора.

Если слой загрязнения имеет толщину  $\Delta$  с удельным объемным сопротивлением  $\rho$ , то для цилиндрического гладкого изолятора диаметром  $D$  сопротивление утечки по поверхности равно:

$$R_{\delta} = \frac{\rho \cdot L_{\delta}}{\pi \cdot \Delta \cdot D}, \quad (50)$$

где  $L_{\delta}$  - длина пути утечки.

Из формул (49) и (50) следует:

$$I_{\delta} = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D}{\rho \cdot L_{\delta}}. \quad (51)$$

Таким образом, разрядное напряжение изолятора будет возрастать с увеличением длины пути утечки и уменьшением диаметра изолятора:

$$U_{\text{аэ.д}} = \frac{I_{\delta} \cdot \rho \cdot L_{\delta}}{\pi \cdot \Delta \cdot D}. \quad (52)$$

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

Таким образом, влагоразрядное напряжение изолятора зависит от характеристик слоя загрязнения, его количества и состава, а также от интенсивности и вида увлажнения.

## 4 ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

### 4.1 Механизм пробоя жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики обладают более высокой электрической прочностью по сравнению с газами и нашли очень широкое применение в качестве высоковольтной изоляции в разнообразных устройствах: трансформаторах, кабелях, линиях, конденсаторах, выключателях и т. д.

Жидкие диэлектрики классифицируются на следующие группы:

1) минеральные углеводороды - продукты перегона нефти и каменного угля

(трансформаторное, конденсаторное и др. масла);

2) растительные углеводороды (касторовое, льняное и другие масла);

3) хлорированные углеводороды ароматического ряда (хлордифенил, совтол);

4) кремнийорганические соединения.

Кроме того, жидкие диэлектрики могут быть **полярными и неполярными** (таблица 5).

Таблица 5

Свойства диэлектриков

Вид диэлектрика	$\rho$ , Ом·см	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
Неполярный	$\geq 10^{18}$	1,8...2,5	$\approx 0,001$
Слабополярный	$\approx 10^{11} \dots 10^{12}$	$> 2,5$	$\approx 0,01$
Сильнополярный	$\approx 10^7 \dots 10^8$	$> 5$	$\approx 0,1$

В электроэнергетике имеют дело с технически чистыми жидкими диэлектриками, у которых влияние посторонних примесей ограничено некоторой минимальной концентрацией. Согласно этому в теориях пробоя жидкостей рассматривают влияние посторонних примесей, неизбежно появляющихся при эксплуатации. Посторонними примесями в жидких диэлектриках являются:

а) волокна целлюлозы;

б) углерод;

в) газы;

г) вода;

д) продукты разложения жидкого диэлектрика.

По сравнению с воздухом (газом) пробивные напряжения масла имеют очень большой разброс. Отклонение от среднего составляет 50% и более, а среднеквадратичное отклонение 10...15%.

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

На пробой жидких диэлектриков существенное влияние оказывает множество факторов, которые могут как понижать пробивное напряжение (загрязнения, увлажнение и др.), так и увеличивать его (очистка, давление, барьеры и т.д.).

Основные факторы, влияющие на напряжение пробоя  $U_{пр}$ :

1) загрязнение и увлажнение (увеличение загрязненности и влаги снижает  $U_{пр}$ );

2) вязкость (уменьшение вязкости уменьшает  $U_{пр}$ );

3) температура (с увеличением температуры  $U_{пр}$  уменьшается);

4) давление (для технически чистого масла увеличение давления приводит к увеличению  $U_{пр}$ );

5) наличие барьеров (барьеры могут существенно повысить  $U_{пр}$ , особенно в

резконеоднородном поле;

б) время действия напряжения (с увеличением времени воздействия напряжения  $U_{пр}$  уменьшается);

7) форма, площадь электродов и расстояние между ними (форма электродов создает поля разной степени неоднородности при  $S = const$ , чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже  $U_{пр}$ ; с увеличением площади электродов  $U_{пр}$  уменьшается; увеличение расстояния увеличивает  $U_{пр}$ );

8) полярность электродов при несимметричной их форме (при отрицательной полярности пробивные напряжения больше, чем при положительной).

Пробой жидких диэлектриков – это сложное явление, так как объясняется сложным составом жидких диэлектриков и многими факторами, влияющими на развитие пробоя (загрязнение, форма, размеры и материал электродов, температура, давление и др.) Для хорошо очищенных жидкостей величина электрической прочности достигает 1000 кВ/см.

#### **4.2 Механизм влияния влаги и микропримесей на пробой жидких диэлектриков**

Влага в масле может находиться в трех состояниях:

- 1) в молекулярно-растворенном виде;
- 2) в виде эмульсии (мелкие шарики воды размером 2...10 мкм);
- 3) в виде водяного отстоя на дне бака.

Растворимость воды в жидких диэлектриках зависит от температуры. Например, в минеральном масле при 20°C может растворяться  $\sim 40 \cdot 10^{-6}$  воды по объему, а при 80°C  $\sim 400 \cdot 10^{-6}$ .

Наличие влаги в обоих состояниях сказывается на электрической прочности масла, особенно в присутствии волокон. Наиболее сильно влияет эмульгированная влага. Вследствие большой диэлектрической проницаемости (для воды  $\epsilon = 80$ , для волокон целлюлозы  $\epsilon = 6,4$ ) частички влаги и волокна вытягиваются в область наибольшей напряженности электрического поля, поляризуются и вытягиваются вдоль силовых линий поля. Это может привести к образованию «мостиков», которые увеличивают локальную плотность тока, нагрев, местную напряженность поля в местах разрыва мостиков, вследствие чего начинаются местные ионизационные процессы и может произойти пробой всего межэлектродного промежутка.

Снижение электрической прочности в области малых концентраций вызвано влиянием растворенной влаги, а в области больших концентраций - эмульгированной влаги.

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

Общее количество воды, которое может находиться в масле в молекулярно-растворенном и эмульсионном виде, ограничено. При содержании воды более

0,02% влага выпадает в виде отстоя на дно. Хотя сам отстой и не влияет на электрическую прочность, его появление свидетельствует о существенном ухудшении изоляционных свойств масел.

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

### 4.3 Механизм влияния давления и температуры на пробой жидких диэлектриков

Пробивное напряжение жидких диэлектриков на промышленной частоте 50 Гц сильно зависит от давления. Это связано с наличием и образованием в жидкости при высоком напряжении пузырьков газа, являющихся очагами развития пробоя. В свою очередь электрическая прочность газа сильно зависит от давления (закон Пашена).

На рисунке 16 представлены зависимости пробивного напряжения трансформаторного масла от давления ниже атмосферного. При пониженных давлениях из масла начинают выделяться растворенные в нем газы и его прочность резко падает (рисунок 16, кривая 1).

Из рисунка видно, что зависимость пробивного напряжения от давления увеличивается с повышением степени очистки масла (рисунок 16, кривая 2), что указывает на большое влияние газообразных примесей.

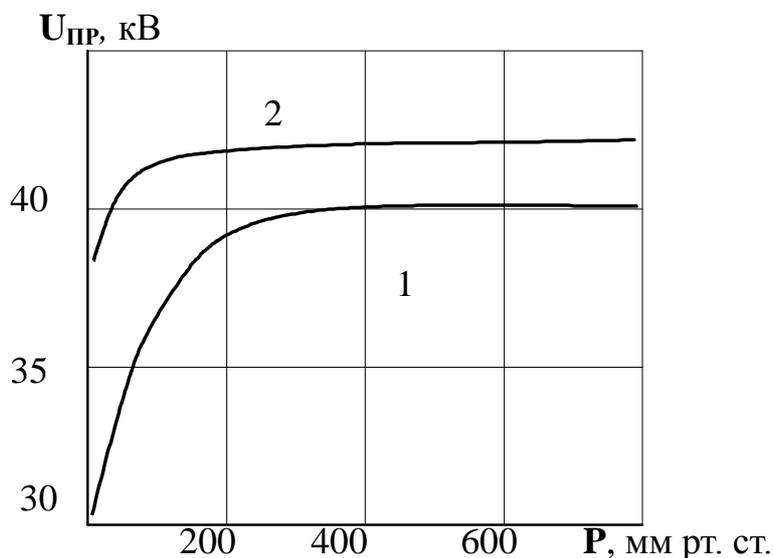


Рисунок 16 - Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления: 1 - недегазированное масло; 2 - дегазированное масло

При давлениях выше атмосферного электрическая прочность масла увеличивается, что говорит о наличии газа в масле и его влиянии на электрическую прочность масла.

При импульсных воздействиях давление меньше сказывается на электрической прочности жидких диэлектриков.

Электрическая прочность жидких диэлектриков в сильной степени зависит от их чистоты. Для чистых сухих жидкостей значительное влияние температуры наблюдается в области интенсивного испарения и кипения (рисунок 17, кривая 1).

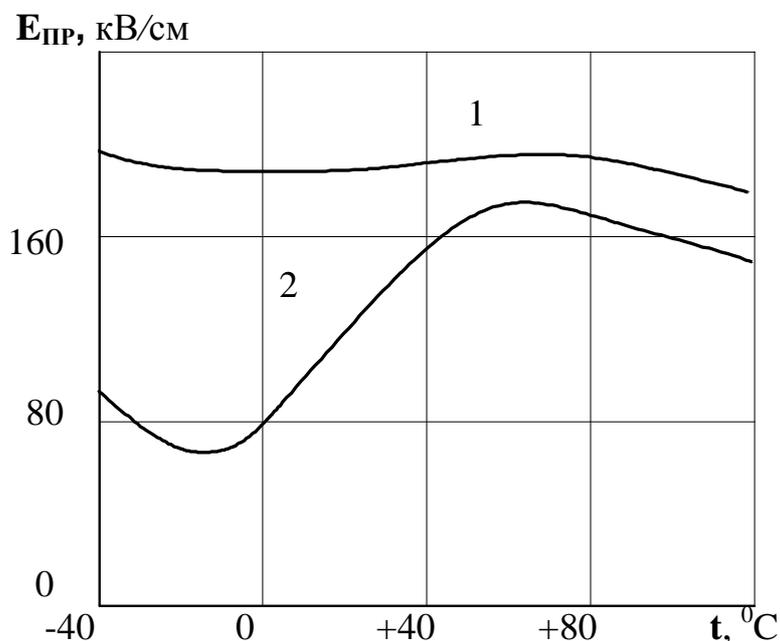


Рисунок 17 - Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от температуры: 1 - сухое масло; 2 - техническое масло с примесью влаги

Для технически чистых жидкостей с примесью влаги зависимость электрической прочности от температуры имеет сложный характер. Из рисунка 17, кривая 2, видно, что существует минимум и максимум электрической прочности. Снижение температуры от точки максимума приводит к уменьшению  $E_{\text{ПР}}$  до минимума, что связано с переходом растворенной влаги в эмульгированное состояние. Дальнейшее понижение температуры (меньше  $0^\circ\text{C}$ ) вызывает замерзание капелек воды и повышение  $E_{\text{ПР}}$ . У льда диэлектрическая постоянная  $\epsilon_{\text{л}}$  примерно равна диэлектрической постоянной масла  $\epsilon_{\text{м}}$  ( $\epsilon_{\text{л}} \approx \epsilon_{\text{м}}$ ), что уменьшает влияние влаги на электрическую прочность масла.

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

#### **4.4 Механизм влияния длительности приложенного напряжения на пробой жидких диэлектриков**

Электрическая прочность жидких диэлектриков существенно зависит от длительности приложения напряжения  $\tau$ , и чем больше примесей в жидкости (особенно влаги и волокон), тем сильнее эта зависимость.

Для жидких диэлектриков характерно наличие двух областей, связанных со временем воздействия напряжения. Их появление можно объяснить различными механизмами пробоя. При воздействии импульсов напряжения с длительностью  $\tau < 10^{-4}$  с влияние примесей ослаблено, т.е. они не успевают переместиться на большие расстояния. Резкое увеличение электрической прочности при  $\tau < 10^{-5}$  с связано с запаздыванием развития разряда. Увеличение времени воздействия напряжения  $\tau > 10^{-3}$  с приводит к быстрому снижению  $U_{пр}$  вследствие влияния влаги и волокон, а также образования газовых пузырьков. При дальнейшем увеличении времени воздействия  $U_{пр}$  снижается, так как начинают оказывать влияние тепловые процессы.

Таким образом, присутствие влаги, газа, загрязнений в жидком диэлектрике сильно снижает его электрическую прочность, причем наиболее опасным является эмульгированное состояние влаги. Пробой наступает при образовании цепочек из мелких поляризованных частиц включений, которые вытягиваются вдоль силовых линий. Цепочки образуют проводящие каналы, по которым протекает ток, разогревающий воду и прилегающую к каналу жидкость до кипения. Пробой жидкости происходит по образовавшемуся газовому каналу.

#### **4.5 Механизм влияния материала электродов, расстояния между ними и полярности. Барьерный эффект**

Геометрическая форма электродов создает поля разной степени неоднородности, и чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже пробивное напряжение. Даже незначительное увеличение радиуса кривизны электродов в резконеоднородных полях дает более существенное увеличение  $U_{пр}$  по сравнению с воздухом. Увеличение расстояния между электродами  $S$  приводит к увеличению пробивного напряжения (рисунок 18).

На величину пробивного напряжения при неизменном  $S$  оказывает влияние площадь электродов и объем жидкости между электродами. Увеличение площади электродов и объема жидкости вызывает снижение  $U_{пр}$ . Состояние поверхности электродов также влияет на электрическую прочность  $E_{пр}$  жидких диэлектриков. Загрязнение, окисление и плохая полировка поверхности электродов снижают  $E_{пр}$ . По мере увеличения расстояния между электродами влияние материала электродов уменьшается и при расстоянии несколько миллиметров практически прекращается.

Пробивное напряжение зависит от полярности электрода (см. рисунок 18) при несимметричной системе электродов. Наиболее ярко эта зависимость проявляется для полярных жидкостей. Например, для воды увеличение  $U_{пр}$

при отрицательной полярности острия достигает 2,0-2,5 раз по сравнению с положительной полярностью.

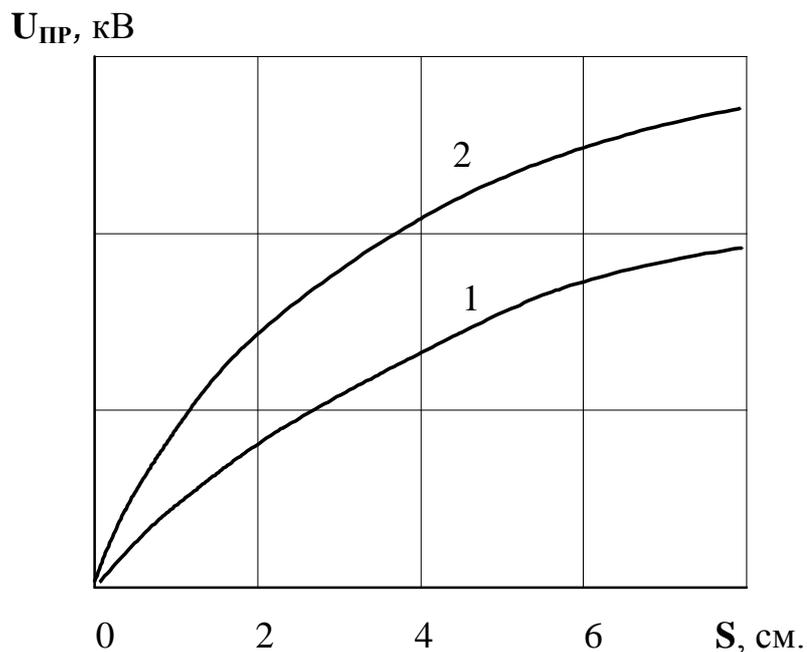


Рисунок 18 - Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и полярности (электроды острие-плоскость): 1 - положительная полярность острия; 2 - отрицательная полярность острия; напряжение постоянное

Барьеры из твердого изоляционного материала устанавливаются в масле между электродами и широко применяются для повышения электрической прочности масляной изоляции.

Наличие барьеров значительно увеличивает электрическую прочность разрядного промежутка. Это можно объяснить тем, что барьер непроницаем для ионов жидкости. Ионы, двигаясь от одного электрода к другому, оседают на барьере, «растекаются» по его поверхности и заряжают ее. Электрическое поле в промежутке становится более равномерным, что приводит к увеличению разрядного напряжения. Кроме того, барьер затрудняет образование сплошных проводящих мостиков из волокнистых веществ, находящихся в масле. Действие барьеров более эффективно в неравномерных полях. При импульсных напряжениях барьеры менее эффективны, чем на постоянном и переменном напряжениях.

В качестве барьера применяется плоский электрокартон толщиной 5 мм. Маслобарьерная изоляция широко применяется в высоковольтной технике при изготовлении трансформаторов, вводов, реакторов и т.п.

## 5 ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

### 5.1 Механизм пробоя твердой изоляции

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой:  $U_{пр\ тв} > U_{пр\ ж} > U_{пр\ г}$ .

Электрическая прочность твердой изоляции зависит от ряда факторов:

- 1) формы электрического поля;
- 2) вида напряжения и полярности;
- 3) времени воздействия напряжения;
- 4) однородности диэлектрика;
- 5) электрофизических характеристик (полярный-неполярный,  $tg\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\gamma$  и др.);
- б) температуры.

Различают три вида пробоя твердого диэлектрика:

- 1) электрический -  $E \sim 10^2 - 10^3$  кВ/мм;
- 2) тепловой -  $E \sim 10 - 10^2$  кВ/мм;
- 3) старение -  $E \sim 10$  кВ/мм и менее.

Твердая изоляция включает в себя все виды твердых диэлектриков от пленок до толстой монолитной.

В таблице 6 приведены некоторые электрические характеристики твердой изоляции.

Таблица 6

Характеристики изоляции

Эл. характеристики	Мех. характеристики	Тепловые характеристики	Хим. характеристики	Прочие
$U_{пр}$ $U_{пер}$ $U_{раб}$ $U_{сухо\ разр}$ $\rho V, \rho S$ $tg\ \delta$ $t = f(E, f)$	$\sigma_{раст}$ $\sigma_{сж}$ $\sigma_{изг}$ Твердость Гибкость Эластичность	$T_{кип}$ $T_{плавл}$ $T_{заст}$ Теплопроводность Теплоемкость Тепловое расш.	Стабильность Растворимость Действие на др. диэлектр.	Удельный вес Абсорбция влаги Действие облуч. Микроорганизмы и др.

Наиболее сильное влияние на электрическую прочность твердой изоляции оказывают время приложения напряжения, температура, толщина. Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения называется вольт-временной характеристикой (рисунок 19).

На кривой выделяют 4 области. Области I и II соответствуют электрическому пробую. Возрастание пробивного напряжения в I области обусловлено запаздыванием развития разряда относительно времени приложения напряжения. Область III характеризуется резким спадом пробивного напряжения, которое связано с тепловыми процессами. Область IV

- медленное снижение пробивного напряжения с увеличением времени воздействия связано с медленными процессами старения твердой изоляции.

Электрическая прочность  $E_{пр}$  твердой изоляции возрастает с уменьшением ее толщины.

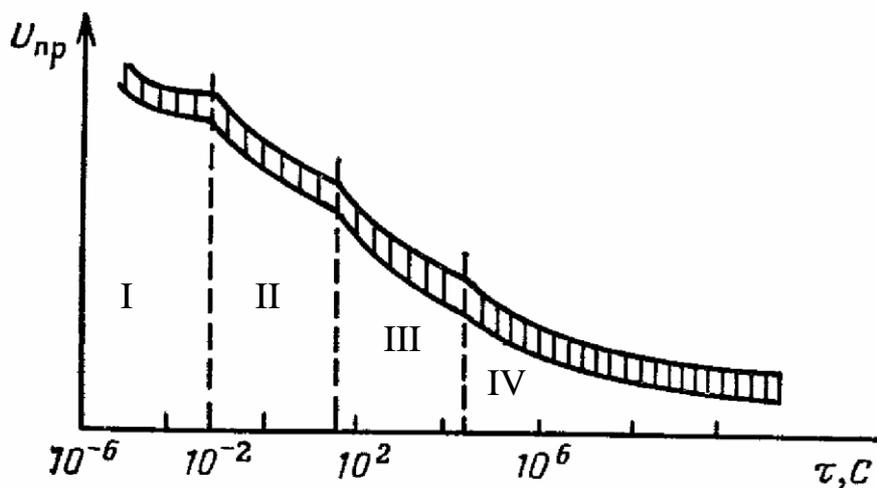


Рисунок 19 - Вольт-временная характеристика твердой изоляции

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

$$U_d \rightarrow I_d \rightarrow T_d \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow \text{ и } \text{tg}\delta \uparrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow T_d \uparrow \text{ и т. д.}, \quad (53)$$

где  $U_d$  - напряжение, приложенное к изоляции;

$I_d$  - ток, текущий через изоляцию;

$T_d$  - температура изоляции;

$\gamma$  - проводимость изоляции;

$\text{tg}\delta$  - диэлектрические потери в изоляции.

Рассмотрим аналитически, как происходит тепловой пробой. Пусть  $Q_1$  - тепло, выделенное в изоляции за счет джоулевых и диэлектрических потерь,  $Q_2$  - отводимое от изоляции тепло в окружающую среду.

Выделенное тепло определяется по формуле:

$$Q_1 = \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta \cdot U^2, \quad (54)$$

а отводимое тепло:

$$Q_2 = k \cdot S \cdot (T - T_0), \quad (55)$$

где  $\omega$  - угловая частота;

$C$  - емкость изделия;

$\text{tg}\delta$  - диэлектрические потери в изоляции;

$k$  - коэффициент теплопередачи;

$S$  - площадь поверхности изоляции;

$T_0$  - температура окружающей среды;

$T$  - температура внутри диэлектрика.

При повышении приложенного напряжения к изоляции изменяется величина потерь в ней. И при  $Q_2 < Q_1$  запускается механизм теплового пробоя, из-за невозможности отвода дополнительного тепла от изоляции в окружающую среду.

## 5.2 Возникновение частичных разрядов и их влияние

Под действием высокой напряженности электрического поля в изоляции в местах с пониженной электрической прочностью возникают частичные разряды, которые представляют собой пробой газовых включений, локальные пробои малых объемов твердого диэлектрика.

Условия возникновения частичных разрядов определяются конфигурацией электрического поля изоляционной конструкции и электрическими характеристиками рассматриваемой области изоляции.

Частичные разряды обычно не приводят к сквозному пробую диэлектрика, однако приводят к местному разрушению изоляции, а при длительном существовании могут привести и к сквозному пробую.

Возникновение частичных разрядов всегда свидетельствует о местной неоднородности диэлектрика. В связи с этим регистрация их характеристик позволяет оценивать качество изготовления изоляции и выявлять местные дефекты.

Характеристики частичных разрядов достаточно хорошо позволяют судить о степени дефектности изоляционной конструкции.

Изучение характеристик частичных разрядов в зависимости от различных условий работы является вопросом первостепенной важности для кабелей, конденсаторов, трансформаторов и других устройств, где применяется слоистая изоляция.

Рассмотрим, каким образом возникают частичные разряды. Составим эквивалентную схему замещения диэлектрика с общей емкостью  $C_э$  (рисунок 20).

Величина  $C_э$  определяется по формуле:

$$C_э = C_0 + \frac{C_в \cdot C_д}{C_в + C_д}. \quad (56)$$

Частичные разряды возникают тогда, когда напряжение на включении достигает пробивного значения  $U_{пр}$ . Напряженность электрического поля во включении  $E_в$  связана с напряженностью в остальной части диэлектрика следующим образом:

$$E_в = E_д \frac{\epsilon_д}{\epsilon_в}, \quad (57)$$

где  $E_д$  - напряженность электрического поля в диэлектрике;

$\epsilon_d$  - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  
 $\epsilon_v$  - относительная диэлектрическая проницаемость включения.

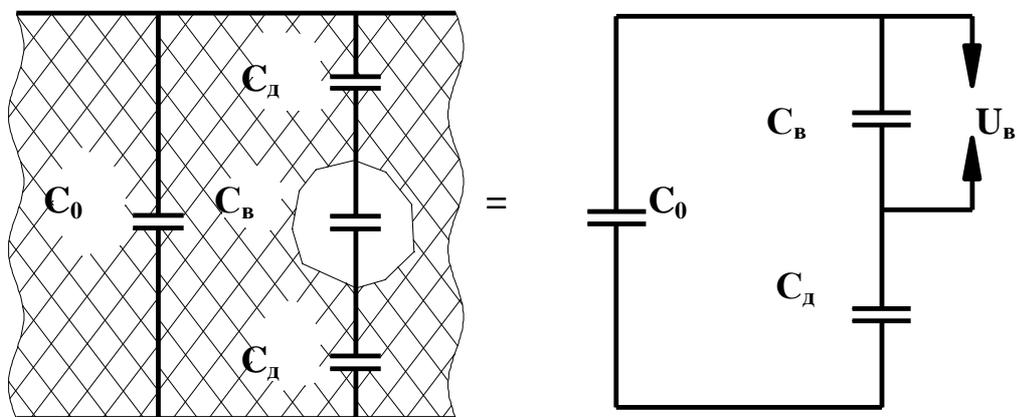


Рисунок 20 - Схема замещения твердого диэлектрика:  $C_0$  - емкость бездефектной изоляции;  $C_v$  - емкость воздушного включения;  $C_d$  - емкость диэлектрика последовательно с включением;  $U_v$  - напряжение пробоя воздушного включения

На основании формулы (57) напряженность электрического поля в газовом включении (и в любом другом, где  $\epsilon_v < \epsilon_d$ ) всегда выше, чем в остальном диэлектрике.

Наибольшую опасность частичные разряды представляют на переменном или импульсном напряжении.

Разрушающее их действие на диэлектрики обусловлено следующими факторами:

- 1) тепловое воздействие;
- 2) воздействие заряженными частицами;
- 3) воздействие химически активными продуктами разряда (озон, окислы азота);
- 4) воздействие излучения.

В зависимости от величины заряда  $q_{чр}$ , измеряемого при частичном разряде, возможна следующая классификация:

1. При превышении некоторого порога напряжения в изоляции возникают частичные разряды с интенсивностью  $q_{чр} = 10^{-12} \dots 10^{-11}$  Кл. Такие разряды не вызывают быстрого разрушения изоляции и могут быть допустимы. Они получили название - начальные.

2. Дальнейшее возрастание напряжения или увеличение размеров включений в процессе длительной работы изоляции приводит к резкому возрастанию интенсивности частичных разрядов, возрастает  $q_{чр}$  до величины  $10^{-10} \dots 10^{-8}$  Кл. Так как их возникновение резко сокращает срок службы изоляции, то они не допускаются при рабочих условиях. Такие разряды

называются критическими.

На постоянном напряжении интервал между частичными разрядами во включении составляет секунды-десятки секунд, что на несколько порядков больше, чем на переменном напряжении промышленной частоты. Это позволяет увеличить рабочие напряженности электроизоляционных конструкций постоянного напряжения по сравнению с переменным.

## 6 ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Высоковольтная изоляция подразделяется на **внутреннюю** и **внешнюю**. Внешняя находится в контакте с атмосферой, внутренняя - внутри герметичного объема. Различается также изоляция для наружной и внутренней установки (наружная - вне помещений, внутренняя - отделена от внешних воздействий).

Различают кратковременное пробивное напряжение  $U_{ПР}$  и длительное рабочее  $U_{РАБ}$ . На изоляцию воздействуют грозовые и коммутационные импульсы, испытательные напряжения, а  $U_{РАБ}$  должно воздействовать длительное время (20-30 лет) без пробоев.

При длительном воздействии  $U_{РАБ}$  происходит старение изоляции.

Причинами старения являются:

- 1) электрические - частичные разряды, трекинг, изменение  $\gamma$ ,  $tg\delta$ ;
- 2) тепловые - ускорение химических реакций, увеличение  $tg\delta$ , уменьшение  $\rho$ ;
- 3) механические - трещины, усталость, разрушение;
- 4) химические - окисление, образование радикалов и т. п.;
- 5) внешняя среда - влага, ультрафиолетовое лучи, температура.

### 6.1 Высоковольтные изоляторы

По назначению изоляторы подразделяется на **линейные** и **станционно-аппаратные**, которые делятся на **опорные** и **проходные**.

**Линейные изоляторы** применяются для крепления и изолирования проводов и тросов воздушных линий электропередачи. По конструктивному исполнению они подразделяются на **штыревые** и **подвесные**.

**Штыревые изоляторы** изготавливаются из электротехнического фарфора или стекла и монтируются на опорах с помощью штырей или крюков (рисунок 21). Выпускаются различного конструктивного исполнения. Обозначение, например, ШФ10-В - штыревой, фарфоровый, номинальное напряжение 10 кВ, конструктивное исполнение В (всего существует три варианта конструктивного исполнения - А, Б, В). Выпускаются промышленностью на напряжение до 35 кВ.

**Подвесные изоляторы** применяются для напряжений больше 35 кВ. Подразделяются на **тарельчатые** (шарнирные) и **стержневые**. Изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла и полимерных

материалов. На рисунке 22 приведена конструкция подвесного тарельчатого изолятора.

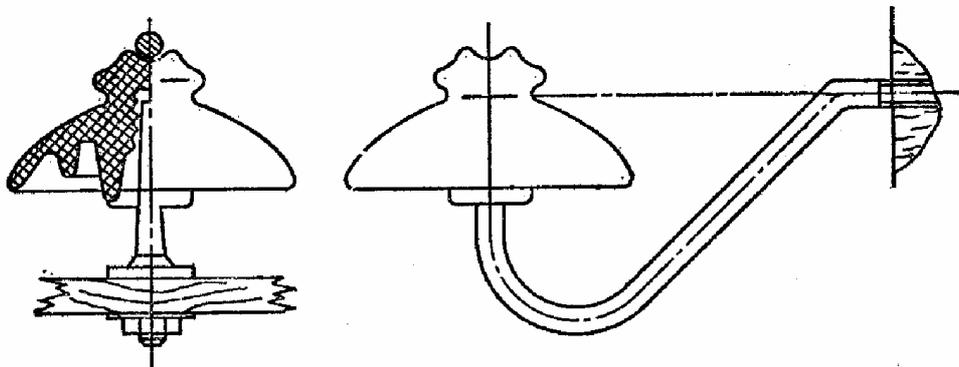


Рисунок 21 – Штыревой линейный изолятор

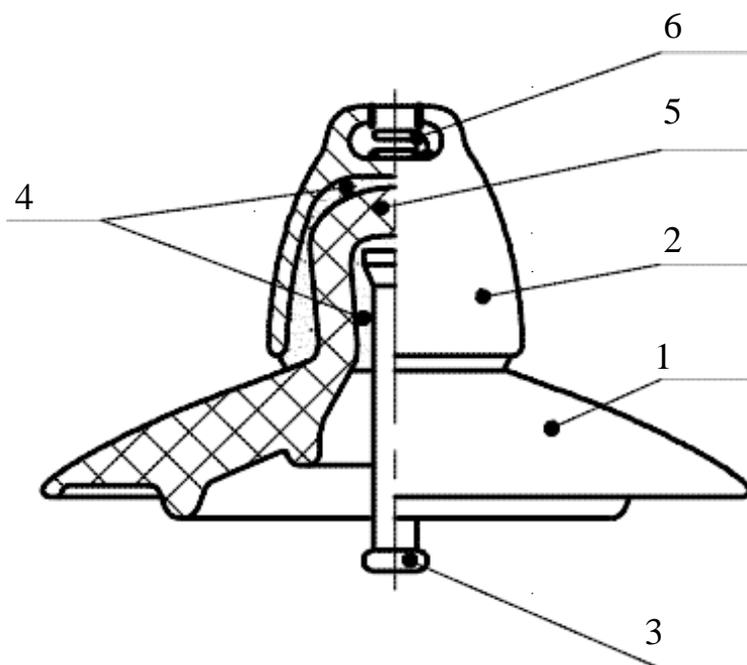


Рисунок 22 - Подвесной тарельчатый изолятор: 1 - тарелка изолятора; 2 - чугунная шапка; 3 - стальной стержень; 4 - цементная замазка; 5 - головка изолятора; 6 - замок

Шапка 2 и стержень 3 обеспечивают шарнирное соединение одного изолятора с другим при сборке в гирлянду изоляторов. Изоляторы испытывают только растягивающие усилия. Благодаря конструкции головка 5 изолятора работает на сжатие и поэтому выдерживает очень большие механические нагрузки (до 30-50 Тс). Обозначение изолятора, например, ПСГ6-А - подвесной, стеклянный, грязеустойчивый. Минимальная разрушающая нагрузка 6 тонн-сила.

Подвесные стержневые изоляторы (рисунок 23) изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла, ситалла, стекловолокна с полимерным покрытием. Один изолятор может заменить гирлянду из 7 тарельчатых

изоляторов на напряжение 110 кВ. Шарнирно крепится при помощи двух шапок с замками на концах изолятора. Достоинством стержневых изоляторов является непробиваемость, за счет малого диаметра изолятора повышаются градиенты электрического поля по поверхностному перекрытию. Обозначение изолятора, например, СФ- 110/2,25 - стержневой, фарфоровый, номинальное напряжение 110 кВ, минимальная разрушающая нагрузка 2,25 тонн-сила.

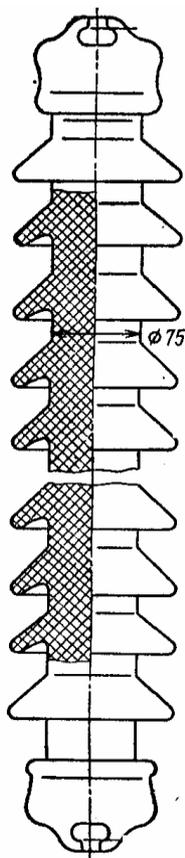


Рисунок 23 – Стержневой подвесной изолятор

**Опорные изоляторы** предназначены для крепления шинпроводов, деталей аппаратов и изолирования их от заземленных конструкций и между собой. Изготавливают для наружной и внутренней установки на напряжение до 110 кВ. На большее напряжение опорные изоляторы собирают в колонны.

Опорные изоляторы для наружной установки делятся на **штыревые** и **стержневые**. Штыревые изоляторы (рисунок 24) используются в тех случаях, когда требуется большая механическая прочность на изгиб. Изготавливаются из электротехнического фарфора. Обозначение, например, ОНШ-35-2000 - опорный, наружной установки, штыревой, номинальное напряжение 35 кВ, минимальная разрушающая нагрузка 2000 кГ- сила.

Опорно-стержневые изоляторы (рисунок 25) изготавливаются на напряжение 35-150 кВ из электротехнического фарфора. Концы изолятора армированы чугунными фланцами. Обозначение, например, ОНС-110-1000 - опорный, наружной установки, стержневой, номинальное напряжение 110 кВ, минимальная механическая прочность 1000 кГ-сила.

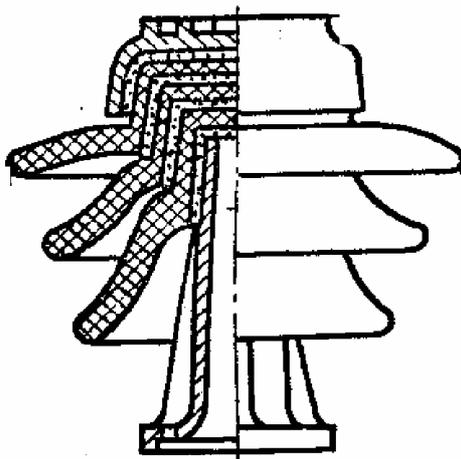


Рисунок 24 – Опорно-штыревой изолятор

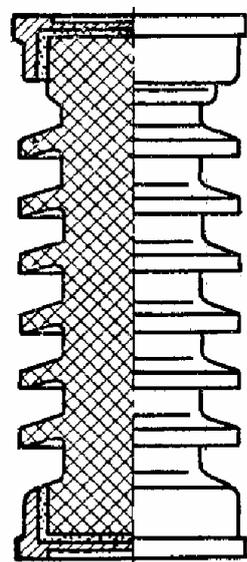


Рисунок 25 – Опорно-стержневой изолятор

**Проходные изоляторы и вводы** используются там, где токоведущие части проходят через стены, перекрытия зданий, ограждения электроустановок или вводятся внутрь металлических корпусов оборудования. Проходными изоляторами называют изоляторы на напряжение до 35 кВ, на напряжение 110 кВ и выше - вводы. Вводы имеют более сложную конструкцию изоляции и выполняются с маслбарьерной изоляцией (до 150 кВ) или с бумажномасляной изоляцией (220 кВ и выше).

Проходные изоляторы на высокие напряжения до 35 кВ включительно изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла, бакелитовой бумаги. На рисунке 26 приведена конструктивная схема проходного изолятора.

Для увеличения напряжения перекрытия  $U_{пер}$  на наружной поверхности изолятора делают ребра, а также увеличивают диаметр изолятора у заземленного фланца. Проходные изоляторы маркируются по напряжению, току и изгибающей механической нагрузке. Например, П-10/400 - 750, что означает: проходной изолятор,  $U_H = 10$  кВ,  $I_H = 400$  А,  $P_{изг} = 750$  кГс.

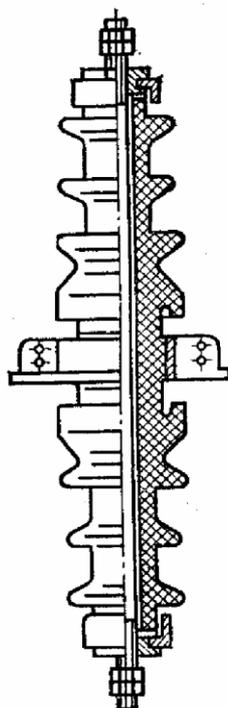


Рисунок 26 – Проходной изолятор на напряжение 35 кВ

**Вводы** - это проходные изоляторы на 110 кВ и выше. Они содержат внешнюю и внутреннюю изоляцию сложной конструкции.

Внешней изоляцией является фарфоровая покрывка. Внутренняя - участки изоляции в теле ввода. Вводы бывают двух типов - маслобарьерные и бумажно-масляные (для  $U_H \geq 220$  кВ).

Маслобарьерный ввод 110-150 кВ конденсаторного типа представлен на рисунке 27. Для повышения напряжения пробоя  $U_{пр}$  разбивают промежуток на  $n$  малых промежутков барьерами 5 и выравнивают поле металлическими обкладками (фольга на барьерах). Что дает в результате повышение  $U_{пр}$  в  $\sim 2,5$  раза.

Обкладки выравнивают поле в радиальном и аксиальном направлениях. Токоведущий стержень обматывается несколькими слоями бумаги. Основную электрическую прочность изоляции ввода обеспечивает масло, находящееся внутри покрывки.

Бумажно-масляный ввод конденсаторного типа на класс напряжения  $U \geq 220$  кВ изготавливается путем намотки на токоведущий стержень (или трубу) изоляционного тела из бумаги. Через каждые 2-4 мм намотки бумаги в тело закладываются конденсаторные обкладки из алюминиевой фольги для выравнивания поля в осевом и радиальном направлениях. После намотки тело пропитывается маслом в вакууме, а после сборки ввод герметизируется.

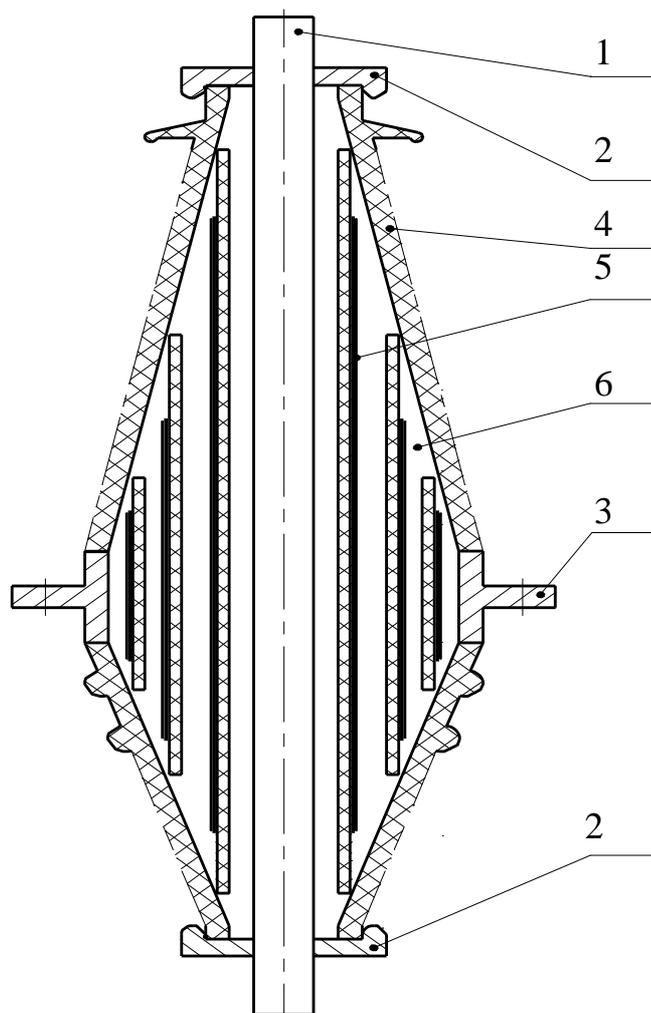


Рисунок 27 - Маслобарьерный ввод: 1 - токопровод (стержень), 2 - высоковольтный фланец, 3 - заземленный фланец, 4 - фарфоровая рубашка, 5 - барьеры с обкладками, 6 - масло

## 6.2 Изоляция высоковольтных конденсаторов

Высоковольтные конденсаторы используются для:

- 1) улучшения  $\cos\varphi$  (косинусные конденсаторы, конденсаторы продольной емкостной компенсации);
- 2) высокочастотной связи;
- 3) силовых установок повышенной частоты;
- 4) выпрямительных установок - фильтры и др.;
- 5) высоковольтных импульсных установок.

В качестве изоляции используется: газ, жидкости, твердые неорганические материалы, твердые органические материалы. Твердая изоляция в высоковольтных конденсаторах чаще органическая - бумага, пленки с пропиткой маслом.

Конденсатор характеризуется удельной запасаемой энергией, которая может быть определена по формуле:

$$W_{\text{óä}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \dot{A}_0^2}{2}. \quad (58)$$

Высоковольтные конденсаторы разного назначения, разных номинальных напряжений и реактивной мощности устроены одинаково: состоят из пакетов секций, соединенных последовательно-параллельно и расположенных в герметизированном корпусе, залитом пропиточной жидкостью.

Основным элементом любого силового конденсатора является секция - спирально намотанный рулон из лент диэлектрика и алюминиевых обкладок, выполняющих роль электродов. Секции после намотки сплющивают для уменьшения объема (рисунок 28).

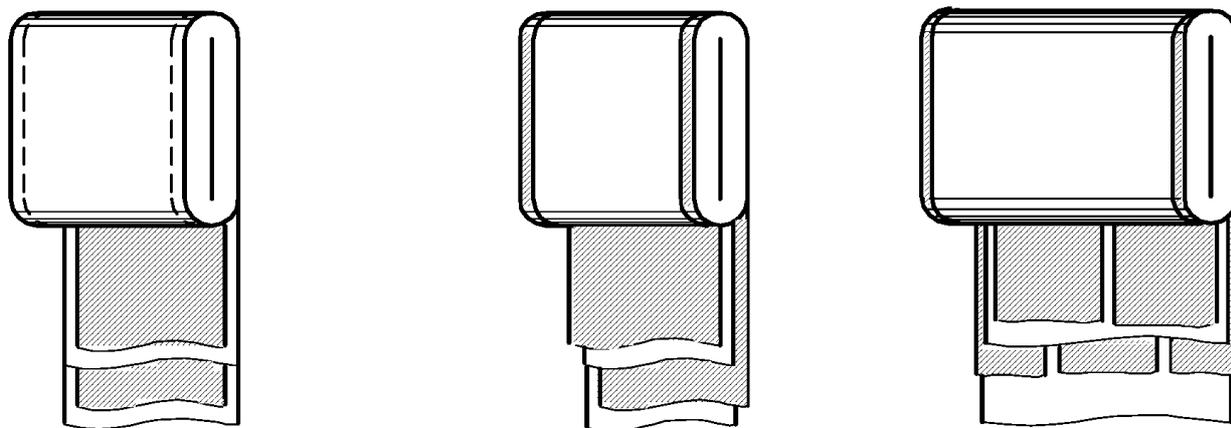


Рисунок 28 - Устройство секции высоковольтного конденсатора

### 6.3 Изоляция трансформаторов

В силовых трансформаторах изоляция состоит из различных по конструкции элементов, работающих в разных условиях. **Внешняя изоляция** представляет собой воздушные промежутки между вводами и по их поверхности. **Внутренняя изоляция** - это изоляционные участки, расположенные внутри бака трансформатора и внутри вводов. Внутренняя изоляция подразделяется на **главную** и **продольную**. **Главная изоляция** - между разными обмотками, стенками бака, магнитопроводом и др. **Продольная изоляция** - между элементами одной и той же обмотки: между витками, слоями, катушками.

В высоковольтных силовых трансформаторах в качестве главной используется маслбарьерная изоляция. Продольная изоляция выполняется бумажно-масляной. Количество барьеров зависит от номинального напряжения трансформатора.

На рисунке 29 приведено устройство главной изоляции высоковольтного трансформатора.

Высоковольтные обмотки выполняются катушечного типа или непрерывной цилиндрической многослойной намоткой.

Трансформаторы до 35 кВ выполняются с изолированной нейтралью. Трансформаторы свыше 110 кВ - с эффективно-заземленной нейтралью.

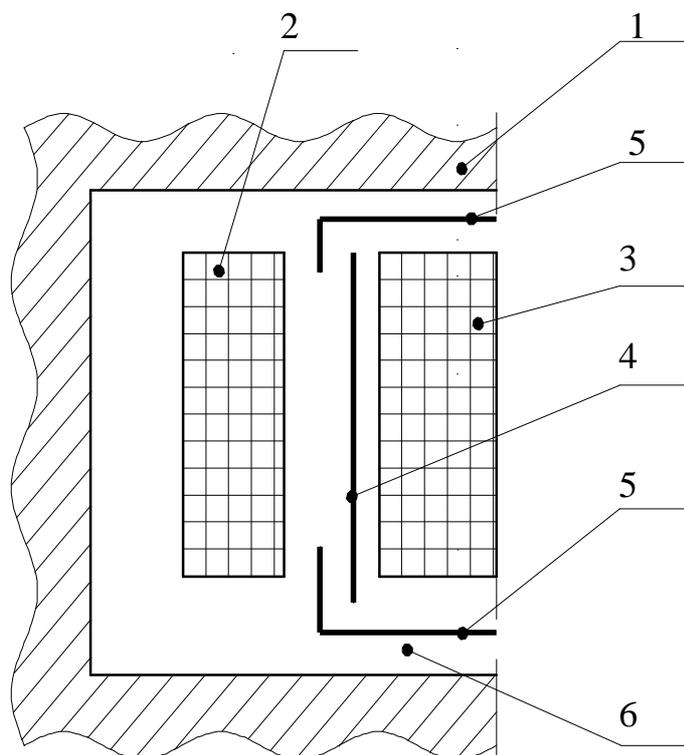


Рисунок 29 - Устройство изоляции высоковольтного трансформатора: 1 - магнитопровод, 2 - низковольтная обмотка, 3 - высоковольтная обмотка, 4 - барьер, 5 - щитки электроизоляции, 6 - масло

#### 6.4 Изоляция кабелей

Основным назначением кабельных линий является передача электрической энергии от подстанции к потребителям.

Высоковольтные силовые кабели выполняются трех типов:

- 1) кабели с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой на напряжение до 35 кВ;
- 2) кабели с бумажной изоляцией с пропиткой маслом под давлением - маслонаполненные кабели: 2...3 атм - низкое давление; 4...5 атм - среднее давление; 8...15 атм - высокое давление;
- 3) кабели с монолитной полимерной изоляцией (полиэтилен, фторопласт и др.).

Кроме того применяются кабели в трубах под давлением масла или газа. Ведется разработка новых криогенных кабелей с охлаждением до температуры жидкого азота (77 К) или жидкого гелия (5 К). Кабели выполняются на высокое напряжение до 500 кВ.

На рисунке 30 представлено устройство трехфазного кабеля с поясной изоляцией на рабочее напряжение до 35 кВ. На 35 кВ выпускаются кабели с отдельно свинцованными жилами и броней из стальных лент типа АОСБ (А -

алюминиевая жила, О - отдельно оцинкованные жилы, СБ - броня стальными лентами).

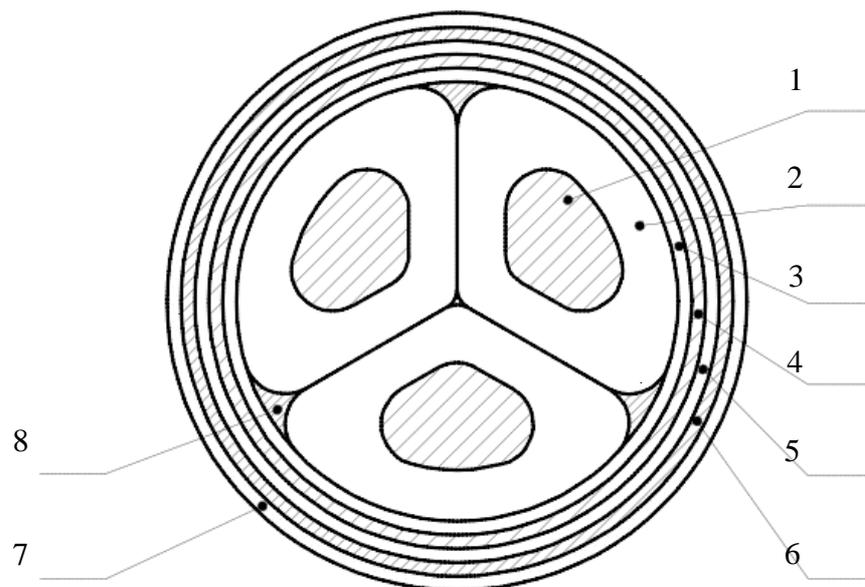


Рисунок 30 – Трехжильный кабель с поясной изоляцией до 35 кВ: 1 - жила, 2 - фазная изоляция, 3 - поясная изоляция, 4 - герметичное покрытие, 5 - подушка, 6 - броня, 7 – наружный защитный покров, 8 - наполнитель

На рисунке 31 показана схема маслонаполненного кабеля на рабочее напряжение 110 кВ. Он выполняется однофазным в свинцовой оболочке с броней из круглых или плоских проволок. Например, типа МССК-110 - М - маслонаполненный; С - среднего давления; С - свинцовый экран; К - броня круглой стальной проволокой.

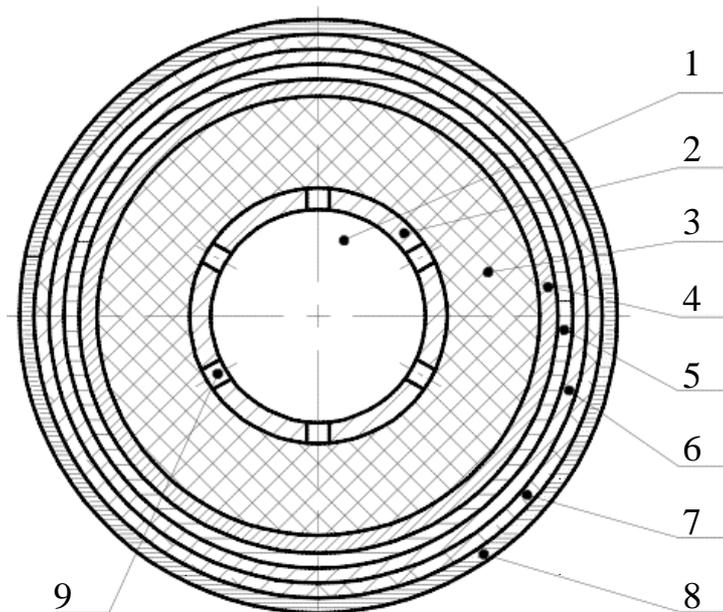


Рисунок 31 – Одножильный кабель на напряжение 110 кВ: 1 - масляный канал, 2 - перфорированная токоведущая жила, 3 - бумажно-масляная изоляция, 4 - полупроводящий слой, 5 - герметичное покрытие, 6 - подушка, 7 - броня, 8 - антикоррозийное покрытие, 9 - отверстия для прохода масла в изоляцию

## 6.5 Изоляция электрических машин

К вращающимся машинам высокого напряжения относятся турбо- и гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и двигатели большой мощности с номинальным напряжением 6 кВ и выше. К их изоляции предъявляются очень высокие требования. Устройство изоляции вращающейся машины высокого напряжения определяется конструкцией ее статорной обмотки. Изоляция статорных обмоток подразделяется на **главную (корпусную)** и **продольную**. Главная – это изоляция между проводниками обмотки и корпусом, а продольная – между витками одной катушки и катушками в одном пазу (рисунок 32).

Регулирование электрического поля в изоляции статорной обмотки имеет большое значение, так как оно позволяет устранить частичные разряды в воздушных зазорах между поверхностью изоляции и стенками пазов, а также скользящие разряды по поверхности изоляции в местах выхода обмоток из паза статора, где поле получается резконеоднородным. Устранение разрядов достигается применением полупроводящих покрытий из железистой асбестовой ленты и различных лаков.

Изоляционные материалы, используемые в электрических машинах, изготавливают на основе слюды (миканит, микаленты, микафорий), широко используются компаунды (термопластичные), в качестве связующих применяют терморезистивные лаки и смолы.

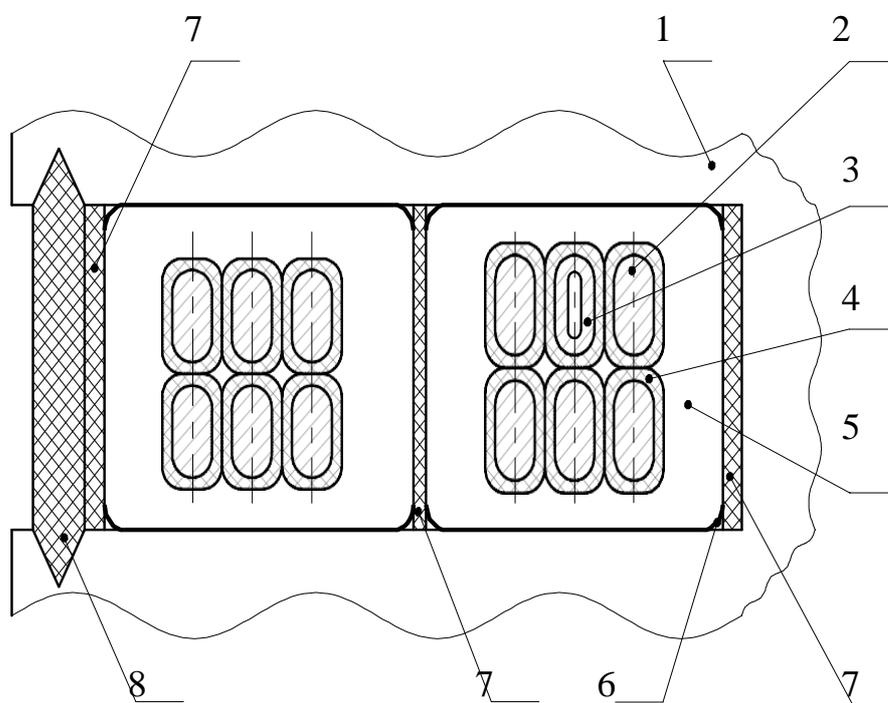


Рисунок 32 - Изоляции высоковольтной электрической машины: 1 - статор, 2 - проводник сплошной, 3 - проводник полой, 4 - витковая (продольная) изоляция, 5 - главная корпусная изоляция, 6 - полупроводящее покрытие, 7 - прокладки, 8 – клин

## 7 ПРОФИЛАКТИКА ИЗОЛЯЦИИ

### 7.1 Задачи и цели профилактики

Профилактика – это система мероприятий, с помощью которых обеспечивается надежная работа изоляции в процессе эксплуатации. Профилактика проводится с целью выявления дефектов в изоляции. Уменьшение электроизоляционных свойств может происходить за счет:

- а) появления местных дефектов;
- б) общего старения.

Местные дефекты появляются в виде трещин, воздушных включений, частичных увлажнений. В большинстве случаев эти дефекты не могут быть обнаружены в результате простого осмотра изоляции, поэтому для их выявления необходима определенная система профилактических испытаний.

Профилактические испытания изоляции резко снижают аварии в энергетических системах из-за своевременного их выявления.

Каждый вид изоляции характеризуется определенными видами дефектов. Изучение их физических особенностей и причин появления является также задачей профилактики изоляции. Это дает возможность правильно организовать эксплуатацию оборудования и разработать наиболее эффективные методы профилактических испытаний.

Согласно вышерассмотренному, задачи профилактики изоляции состоят из:

- 1) создания нормальных условий работы изоляции;
- 2) обнаружения дефектов и их устранения;
- 3) изучения физических особенностей и причин появления дефектов;
- 4) разработки эффективных методов профилактики.

В таблице 7 приведены методы профилактических испытаний изоляции и их характеристика.

Таблица 7

Профилактические испытания изоляции

Метод испытания изоляции	Дефекты, выявляемые этим методом
Измерение сопротивления изоляции	Свободные проводящие пути или пробой
Измерение $\text{tg}\delta$	Процессы ионизации и старения изоляции в целом
Измерение емкости	Общее увлажнение изоляции
Определение наличия частичных разрядов	Процессы ионизации в воздушных полостях
Приложение повышенного напряжения	Местные дефекты при снижении электрической прочности

## 7.2 Метод измерения сопротивления изоляции

Данный метод из-за своей простоты получил очень широкое применение и является одним из основных методов контроля качества изоляции.

Так как любая изоляция имеет конечную величину сопротивления, то при приложении напряжения через изоляцию, кроме токов на зарядку геометрической емкости и абсорбционных токов, течет ток, определяемый электропроводностью диэлектрика. С увеличением дефектности изоляции ток утечки возрастает. Это явление лежит в основе данного метода.

Сопротивление изоляции равно:

$$R_{из} = \frac{U}{I}. \quad (59)$$

На постоянном напряжении  $R_{из}$  будет изменяться во времени, так как на величину тока будут влиять процессы медленной поляризации. На рисунке 33 показан характер изменения тока через изоляцию и сопротивление изоляции от времени.

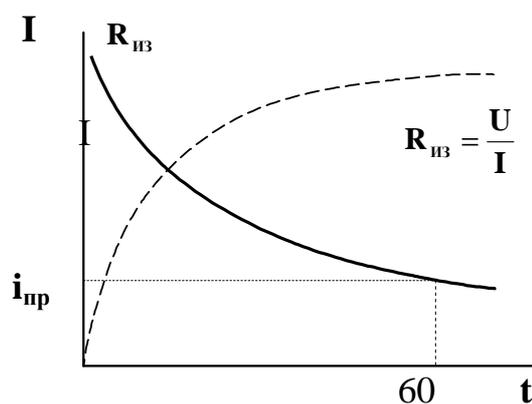


Рисунок 33 - Изменение тока утечки и сопротивления изоляции во времени

Время достижения установившегося значения тока утечки  $I$  меньше 1 мин. для большинства изоляционных конструкций, т. е. к этому времени после приложения напряжения  $R_{из}$  также достигнет установившегося значения.

Резкое падение сопротивления изоляции показывает на наличие и развитие дефекта в изоляции, или на наличие сквозного проводящего пути, или пробоя.

Измерение сопротивления изоляции производится с помощью специальных приборов - мегаомметров, у которых шкала проградуирована в МОм или кОм. Наибольшее применение нашли индукторные (с ручным приводом) типа М-110 на 500 В, МОМ-5 на 1000 В, МС-06 на 2500 и электронные мегаомметры, например, типа ЭСО210.

### 7.3 Метод измерения $\operatorname{tg} \delta$

Диэлектрические потери в изоляции характеризуются углом диэлектрических потерь. Величина  $\operatorname{tg} \delta$  определяется отношением активной составляющей тока в диэлектрике к емкостной составляющей (рисунок 34):

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_A}{I_C}, \quad (60)$$

где  $I_A$  — активная составляющая тока через диэлектрик;  
 $I_C$  — реактивная составляющая тока через диэлектрик.

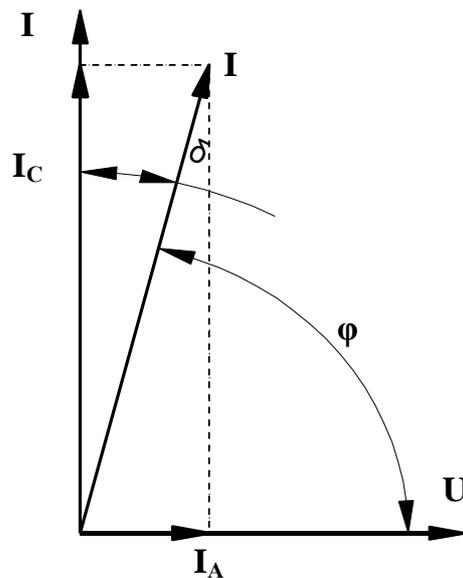


Рисунок 34 - Векторная диаграмма токов и напряжений через диэлектрик

Измерение величины  $\operatorname{tg} \delta$  имеет следующие преимущества:

- 1) величина  $\operatorname{tg} \delta$  не зависит от размеров объекта, но позволяет обнаружить возникающие в изоляции дефекты, особенно если они распространены по всему объему;
- 2) величина  $\operatorname{tg} \delta$  может быть непосредственно измерена мостом переменного тока.

Метод контроля изоляции путем измерения угла диэлектрических потерь является одним из эффективных и распространенных. Он позволяет выявить дефекты: увлажнение, воздушные (газовые) включения с процессами ионизации, неоднородности и загрязнения и др.

Измерения  $\operatorname{tg} \delta$  ведутся при напряжении  $U \leq 10$  кВ и частоте 50 Гц с помощью высоковольтных мостовых схем (мост Шеринга). Оценка состояния изоляции по значению  $\operatorname{tg} \delta$  предусматривается сравнением с нормативными значениями. В зависимости от конструктивных особенностей объекта (заземлен один электрод или нет) используется нормальная или перевернутая схемы моста Шеринга.

По нормальной схеме обычно выполняются измерения в лабораториях, а

также измерения междуфазной изоляции (кабель, трансформатор и т.п.).

Выпускаются мосты типа МДП, которые позволяют измерять  $\text{tg}\delta$  при емкостях объектов от 40 до 20000 пФ.

Для измерений по перевернутой схеме применяется малогабаритный переносной мост МД-16, который позволяет измерять  $\text{tg}\delta$  при емкостях объекта от 30 до 40000 пФ.

#### 7.4 Методы обнаружения частичных разрядов

Различают два метода обнаружения частичных разрядов:

1) Метод измерения электромагнитных волн, излучаемых частичными разрядами, который получил название дефектоскопия. Метод основан на радиоприеме электромагнитных излучений при частичных разрядах в изоляции. Применяется для выявления дефектных изоляторов на линиях электропередачи.

Недостатками этого метода являются: плохая помехоустойчивость (помехи создаются короной проводов и др.); отсутствие количественной оценки.

2) Метод диэлектрических потерь, который основан на определении точки перегиба на кривой зависимости тангенса диэлектрических потерь от напряжения на диэлектрике (рисунок 35). Излом на этой кривой совпадает с возникновением частичных разрядов в объеме изоляции.

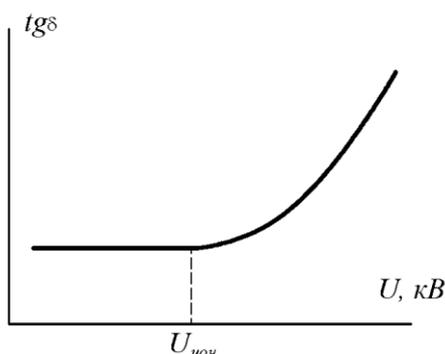


Рисунок 35 - Кривая ионизации

К недостаткам этого метода можно отнести неспособность зарегистрировать сосредоточенные дефекты и место их нахождения. В настоящее время метод регистрации точки перегиба на кривой ионизации вытесняется методами регистрации высокочастотных составляющих тока или напряжения частичных разрядов.

В качестве измерительного средства применяются индикаторы частичных разрядов, которые непосредственно включаются в цепь разряда. Они состоят из приемного контура, усилителя и измерительного прибора.

Измеряются пульсации напряжения  $\Delta U$ , которые через усилитель подаются на пластины электронного осциллографа. По моменту возникновения пульсаций на экране осциллографа определяют напряжение возникновения ионизации, а по амплитуде импульсов и их частоте — интенсивность частичных разрядов. Могут быть использованы несколько вариантов схем:

а) Схема с активным сопротивлением (рисунок 36).

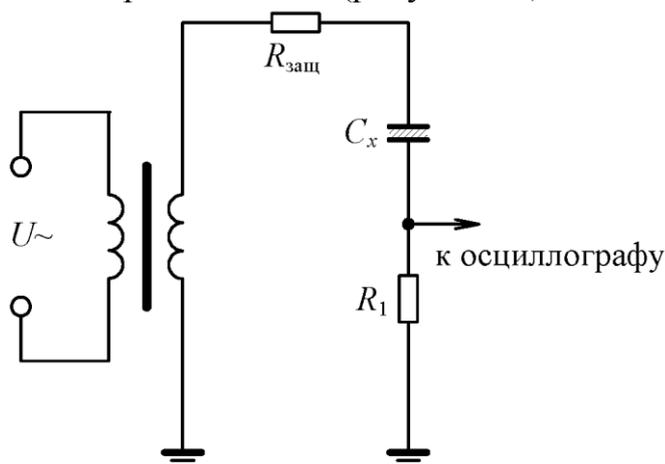


Рисунок 36 - Схема для обнаружения частичных разрядов с помощью активного сопротивления:  $R_{\text{защ}}$  - защитное сопротивление,  $C_x$  - испытуемый объект,  $R_1$  - разделительная емкость

Сопротивление  $R_1$  включается последовательно с измеряемым объектом, и падение напряжения на нем регистрируется индикатором частичных разрядов. По осциллографу судят о наличии частичных разрядов.

На осциллографе можно наблюдать картину, приведенную на рисунок 37.

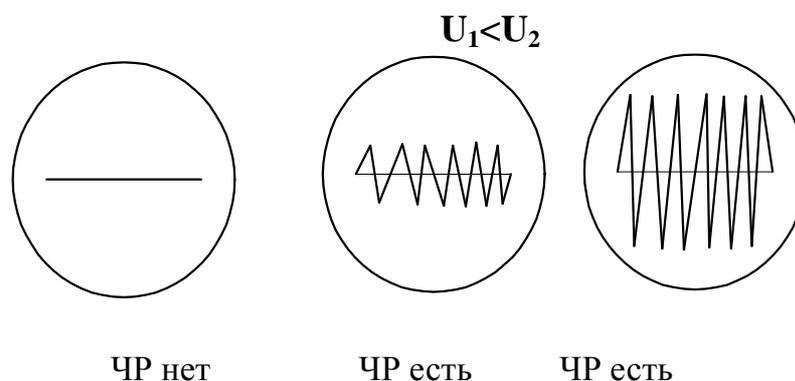


Рисунок 37 - Вид осциллограмм при разной интенсивности частичных разрядов

Недостатком этого метода является малая помехоустойчивость.

б) Схема с индуктивностью и емкостью (рисунок 38).

При возникновении частичных разрядов появляются высокочастотные колебания амплитудой  $\Delta U$ . Индикатор частичных разрядов (ИЧР) подключен к объекту через разделительную емкость  $C_{\text{разд}}$ , которая служит заграждающим фильтром для токов рабочей частоты. Частичные разряды в объекте ( $C_x$ ) возбуждают в измерителе незатухающие периодические колебания с частотой, соответствующей периоду колебаний контура:

$$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}. \quad (61)$$

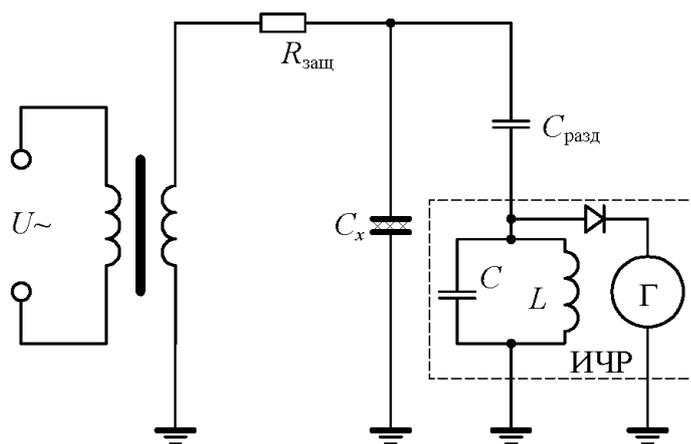


Рисунок 38 - Схема измерения частичных разрядов с применением колебательного контура и гальванометра:  $R_{\text{защ}}$  - защитное сопротивление,  $C_x$  - испытуемый объект,  $C_{\text{разд}}$  - разделительная емкость, L-C - колебательный контур, Г - гальванометр

Частота настройки измерителя частичных разрядов обычно принимается порядка нескольких десятков килогерц. Амплитуда высокочастотных колебаний  $\Delta U$  измеряется гальванометром Г. По значению  $\Delta U$  из формулы б1 определяется кажущаяся интенсивность ионизации.

Использование метода частичных разрядов для профилактических испытаний является весьма перспективным и сейчас широко внедряется в промышленности, т. к. он позволяет вести непрерывный контроль под рабочим напряжением.

Недостатками метода являются:

- 1) наличие большого количества помех, затрудняющих расшифровку полученных результатов (источник помех - корона на проводах, искрение коллекторов электрических машин и т.д.);
- 2) метод фиксирует не наличие дефекта, а наличие разряда, в то время как может существовать дефект и без него (трещина, заполненная водой или другой проводящей жидкостью, обуглероженная пора, где прекратился частичный разряд, хотя это серьезные дефекты).

В комбинации с другими методами профилактики индикация частичных разрядов дает эффективные результаты.

## 7.5 Метод измерения емкости изоляции

Емкость изоляции при постоянной температуре и частоте приложенного напряжения является величиной постоянной. Поэтому скачкообразное изменение величины емкости указывает на наличие в изоляции дефектов. Для контроля увлажнения изоляции нашли метод измерения емкости изоляции при разных частотах, так как увлажнение изоляции оказывает влияние на её емкость.

При увеличении частоты емкость изоляции какого-либо устройства (трансформатора, кабеля, изолятора и т.д.) уменьшается. Это явление положено

в основу метода «емкость-частота». Метод «емкость- частота» заключается в сравнении величин емкости, измеренных при двух различных частотах  $f = 2$  Гц и  $f = 50$  Гц, ( $C_2$  и  $C_{50}$ ) при  $t = 10 - 20^\circ\text{C}$ . О качестве изоляции судят по отношению  $C_2/C_{50}$ : чем это отношение меньше, тем изоляция лучше (суше).

Рисунок 39 показывает зависимость изменения емкости от частоты для сухой (1) и увлажненной изоляции (2).

Опытным путем было найдено, что для сухой изоляции отношение:

$$k_f = \frac{C_2}{C_{50}} \leq 1,2 - 1,3. \quad (62)$$

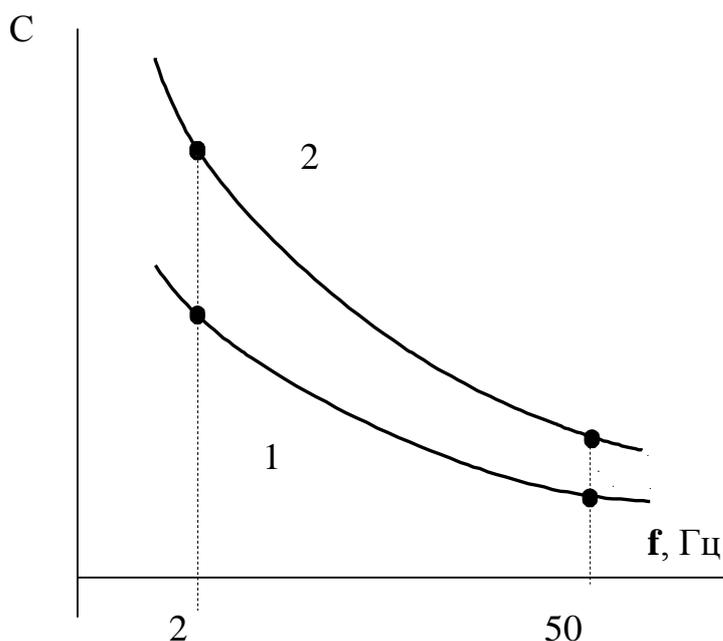


Рисунок 39 - Зависимость емкости изоляции от частоты: 1 - сухая изоляция, 2 - увлажненная изоляция

## 7.6 Испытание изоляции повышенным напряжением

Старение изоляции происходит неравномерно. Это связано с неоднородностью изоляции и внешних воздействий. Скорость процессов старения на разных участках неодинакова. Образуются места, которые имеют меньшую электрическую прочность, чем здоровая изоляция. Например, у электрических машин причиной аварии являются пробой изоляции в местах образования сосредоточенных дефектов. Чтобы предотвратить аварийные повреждения, изоляцию периодически могут испытывать повышенным напряжением для выявления опасных дефектов и для проверки наличия необходимого запаса электрической прочности изоляции.

Испытание повышенным напряжением показывает, что изоляция оборудования имеет нужный уровень прочности по отношению к перенапряжениям.

Испытательное напряжение должно прикладываться к изоляции в течение времени, достаточного для развития частичных разрядов и даже развития разряда до пробоя. В то же время при длительном приложении повышенного напряжения электрическая прочность изоляции резко снижается. На практике применяют 1-минутные испытания напряжением промышленной частоты 50 Гц.

Эффективность испытания определяется величиной испытательного напряжения. При малом напряжении дефекты не выявляются, а при чрезмерно высоком могут пробиться те участки изоляции, которые не пробились бы в эксплуатации. Поэтому испытательное напряжение нормируют.

При выпуске с завода готовых изделий испытание повышенным напряжением является основным видом испытания изоляции. Испытательное напряжение для разных типов оборудования определено действующими стандартами.

При профилактических испытаниях в процессе эксплуатации величина испытательного напряжения должна составлять  $\sim 0,75$  от величины заводского испытательного напряжения.

Испытание повышенным напряжением проводится на переменном, постоянном и импульсном напряжениях.

## **8 ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

### **8.1 Установки для получения высоких переменных напряжений**

Для получения высоких переменных напряжений применяются однофазные высоковольтные испытательные трансформаторы на напряжение до  $U_n = 1200$  кВ. На большие напряжения используют каскадное соединение трансформаторов ( $U_n = 2200$  кВ и более).

Особенностью испытательных трансформаторов являются:

- 1) кратковременность работы;
- 2) отсутствие атмосферных перенапряжений;
- 3) наличие бросков тока и резких спадов напряжения при пробоях и перекрытиях испытуемых объектов.

У такого трансформатора между обмотками низкого и высокого напряжений расположен медный разрезанный экран, соединенный с баком трансформатора (рисунок 40). Экран предназначен для защиты обмотки низкого напряжения от наведения высоких потенциалов при резких изменениях напряжения со стороны высоковольтной обмотки.

На напряжение более 1000 кВ применяются каскадное включение трансформаторов. Каскады трансформаторов обычно состоят из 2-3 высоковольтных испытательных трансформаторов, соединенных последовательно. Так как один вывод обмотки трансформатора соединен с корпусом, то корпус каждого последующего трансформатора находится под высоким напряжением предыдущего трансформатора (рисунок 41).

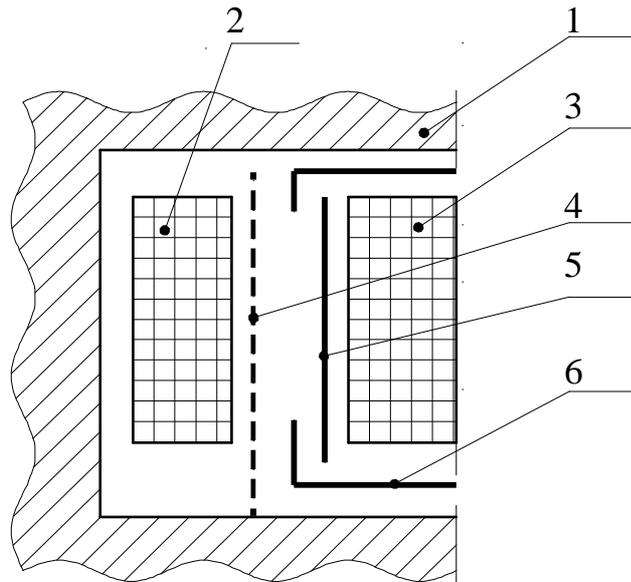


Рисунок 40 - Конструкция однофазного трансформатора: 1 - магнитопровод, 2 - обмотка низкого напряжения, 3 - обмотка высокого напряжения, 4 - экран медный, 5 - барьер электроизоляционный, 6 - шайбы электроизоляционные

Следовательно, все последующие трансформаторы, кроме первого, должны быть изолированы от земли и друг от друга.

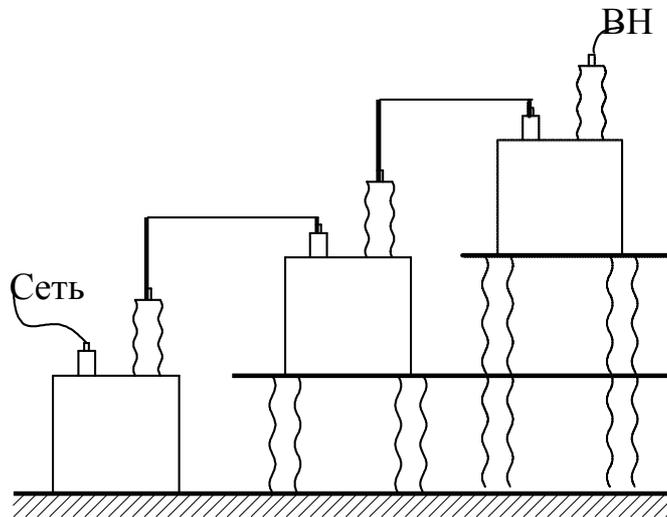


Рисунок 41 - Схема соединения каскада трансформаторов

Напряжение на выходе каскада, состоящего из  $n$  последовательно включенных трансформаторов:

$$U_{ВН} = n \cdot U_2 , \tag{63}$$

где  $U_2$  — напряжение на выходе первого трансформатора.

## 8.2 Установки для получения высоких постоянных напряжений

Постоянное напряжение широко применяется для испытаний конденсаторов, кабелей, вращающихся машин.

Для получения высоких напряжений постоянного тока используются различные выпрямительные установки. Все схемы выпрямления классифицируются по следующим признакам:

- 1) по форме выпрямленного напряжения - одно- и двухполупериодные схемы;
- 2) по схеме соединения выпрямителей - мостовая схема, последовательно-параллельные схемы;
- 3) по числу фаз - одно-, двух- и трехфазные схемы;
- 4) схемы умножения напряжения.

**Однополупериодная** схема выпрямления приведена на рисунках 42 и 43.

Выпрямление напряжения без фильтра по схеме (рисунок 42) дает большую глубину пульсаций выпрямленного напряжения. Наличие фильтра (рисунок 43) уменьшает глубину пульсаций за счет работы конденсатора  $C_{\Phi}$  в течение времени отрицательного полупериода, когда диод  $V$  закрыт.

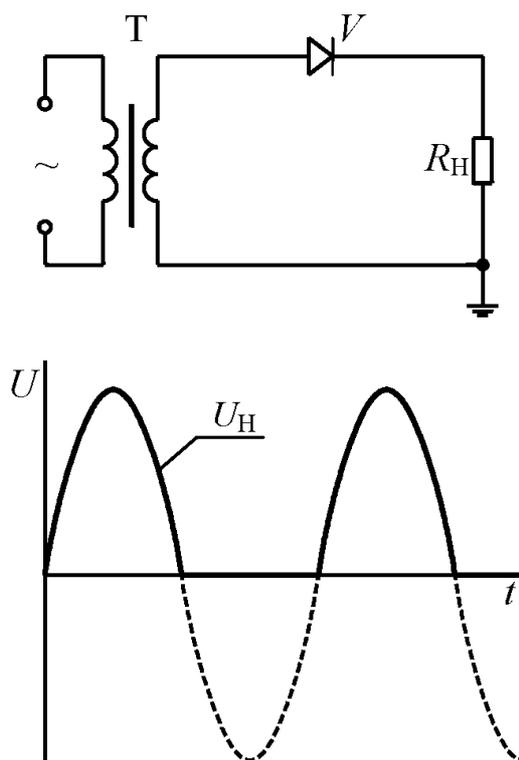


Рисунок 42 - Схема однополупериодного выпрямления без фильтра

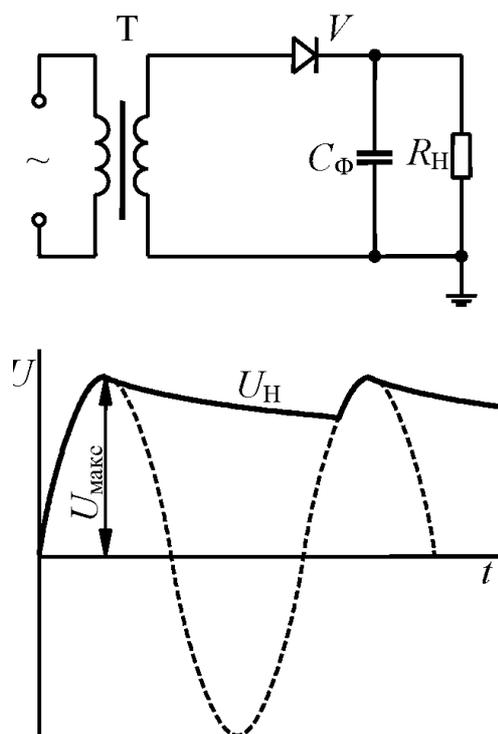


Рисунок 43 - Схема однополупериодного выпрямления с фильтром

**Двухполупериодная** мостовая схема выпрямления приведена на рисунках 44 и 45.

Четыре диода выпрямителя образуют мост, в одну диагональ которого включается нагрузка  $R_H$ , а к другой диагонали подключается трансформатор. При положительном полупериоде открыты диоды  $V1$  и  $V3$ , а при отрицательном полупериоде -  $V2$  и  $V4$ . Такое включение диодов приводит к тому, что через нагрузку протекает ток в одном направлении в течение всего периода переменного тока (см. рисунок 44). Для уменьшения глубины пульсаций выпрямленного напряжения применяется конденсатор  $C_\Phi$  (см. рисунок 45).

Включение однофазных схем выпрямления приводит к перекосу фаз в 3-фазной сети. Для исключения этого явления используют 3-фазные схемы выпрямления (см. рисунок 46).

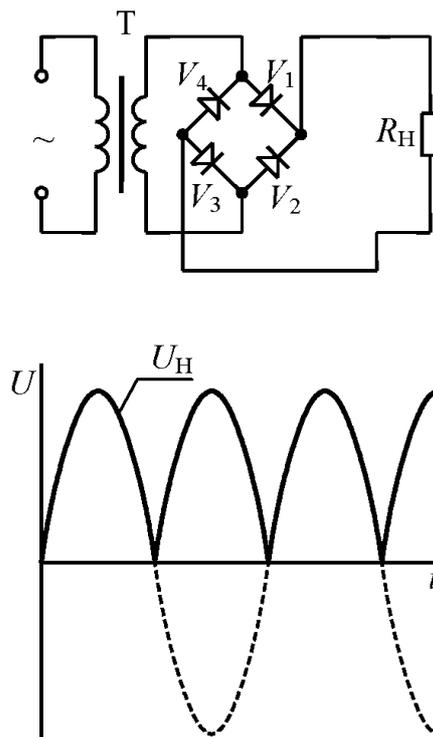


Рисунок 44 - Мостовая схема выпрямления без фильтра

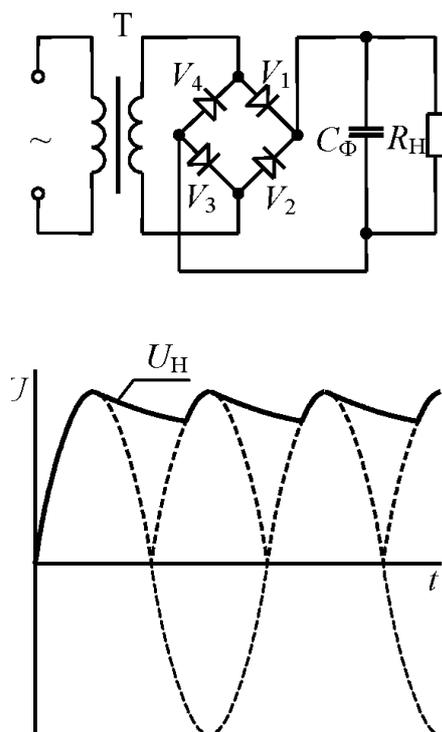


Рисунок 45 - Мостовая схема выпрямления с фильтром

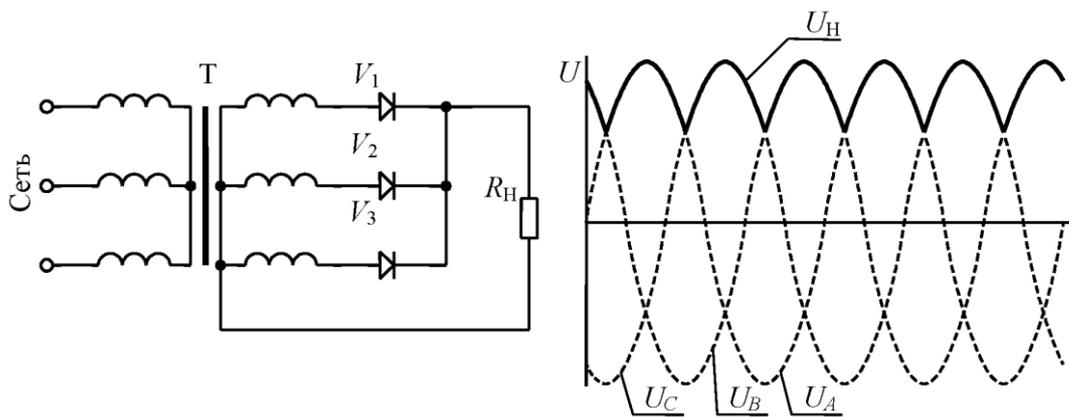


Рисунок 46 - Трехфазная однополупериодная схема выпрямителя

Высокие выпрямленные напряжения удобно получать с помощью схем умножения. Различают следующие схемы:

- 1) схемы удвоения;
- 2) схемы утроения;
- 3) каскадные схемы умножения напряжения.

Простая однополупериодная схема удвоения напряжения приведена на рисунке 47.

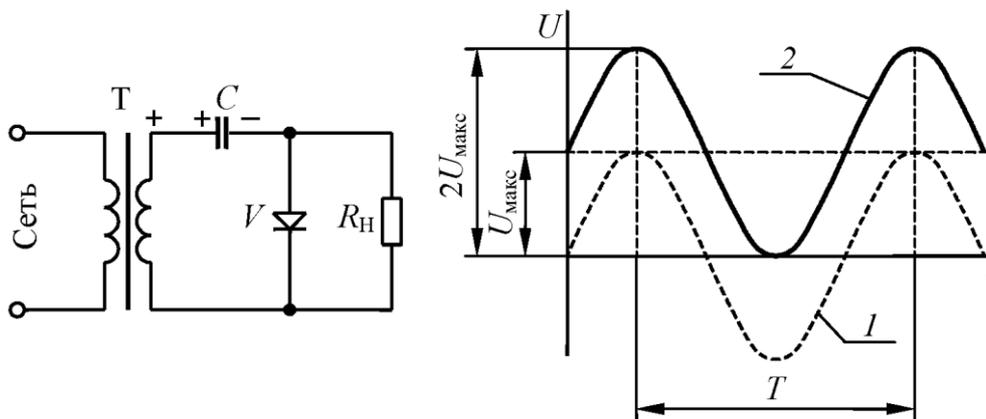


Рисунок 47 - Однополупериодная схема удвоения и осциллограмма напряжения на нагрузке: 1 - фазное переменное напряжение; 2 - удвоенное выпрямленное напряжение

В один полупериод (положительный) выпрямитель пропускает ток. Емкость  $C$  заряжается до  $U_m$ : обкладки имеют полярность "+" и "-". Во втором полупериоде, когда сменилась полярность концов обмотки трансформатора, напряжение трансформатора суммируется с напряжением на конденсаторе. На нагрузке получается пульсирующее выпрямленное напряжение, изменяющееся от нуля до  $2U_m$  (см. рисунок 47).

Выпрямитель оказывается под двойным напряжением  $U_{обр} = 2U_m$ .

Получение высоких напряжений постоянного тока в сотни и тысячи киловольт возможно с помощью схем выпрямления и умножения

выпрямленных высоких напряжений (каскадный генератор).

Схема каскадного генератора постоянного тока включает в себя схемы удвоения напряжения, соединенные в многократной последовательности. Напряжение на выходе каскадного генератора равно:

$$U_{\text{вых}} = 2 \cdot n \cdot U_m, \quad (64)$$

где  $n$  - число ступеней (схем удвоения) в каскаде;

$U_m$  - амплитудное значение питающего трансформатора.

### 8.3 Импульсные испытательные установки

Для испытания изоляции высоковольтного электрооборудования грозowymi и коммутационными импульсами используются генераторы импульсных напряжений (ГИН).

Грозвые воздействия воспроизводятся стандартными импульсами напряжения: полной и срезанной волнами. Стандартные импульсы (1,2/50 или 2,0) можно получить на установке, схема которой приведена на рисунке 48.

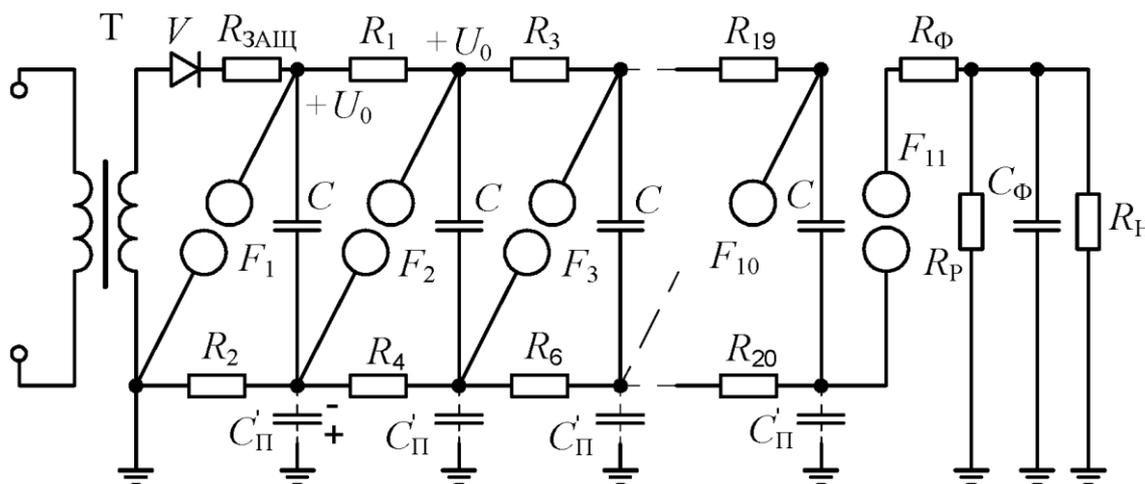


Рисунок 48 - Электрическая схема ГИН с односторонней зарядкой

Зарядка емкостей  $C$  производится параллельно, а разряжаются они последовательно, что приводит к сложению зарядных напряжений ступеней.

Для обеспечения практически одинаковой зарядки всех конденсаторов до  $U_0$  необходимо соблюдать условие:  $R_1 \dots R_{20} \ll R_{\text{заш.}}$ . При напряжении  $U_0$  пробивается только  $F_1$ . Емкость разряжается в контуре  $C - R_2 - F_1$ , но  $R_2$  большое (десятки килоом). В первый момент разрядка идет по  $C - C_{\text{П}} - F_1$  ( $X_c = 1/(\omega C)$ ,  $\omega$  - круговая частота порядка мегагерц, следовательно,  $X_c$  - малое).  $C_{\text{П}}$  быстро заряжается до  $U_0$ . Тогда к  $F_2$  - приложено удвоенное зарядное напряжение  $U_0$ . Поэтому  $F_2$  может иметь расстояние в 2 раза больше, чем  $F_1$ , и т.д.

Для регулирования параметров импульса напряжения и получения стандартной волны используются элементы  $R_{\Phi}$  - фронтовое сопротивление,  $C_{\Phi}$

– фронтовая емкость,  $R_p$  – разрядное сопротивление.

Длину фронта формируют  $C_\phi$  и  $R_\phi$ , длину импульса -  $R_\Sigma$ , т. е.  $R_p$  совместно с  $R_H$ .

$$t_\phi = 3,24 \cdot R_\phi \cdot C_\phi, \quad (65)$$

$$t_b = 0,7 \cdot C_{гин} \cdot R_\Sigma. \quad (66)$$

Изменение амплитуды импульса регулируется изменением расстояния между шаровыми электродами  $F_1, F_2, \dots, F_{10}$ . Промежуток  $F_{11}$  служит для отделения зарядной емкости ГИН от нагрузки при зарядке конденсаторов постоянным напряжением, чтобы исключить воздействие постоянного зарядного напряжения на нагрузку.

ГИН используется для испытания изоляции высоковольтного оборудования. Внутренняя изоляция испытывается приложением трех импульсов полных и трех импульсов срезанных положительной и отрицательной полярности.

#### 8.4 Генератор импульсных токов

Генераторы импульсных токов (ГИТ) используются для имитации воздействия импульсов тока большой амплитуды. Электрическая схема ГИТ приведена на рисунке 49.

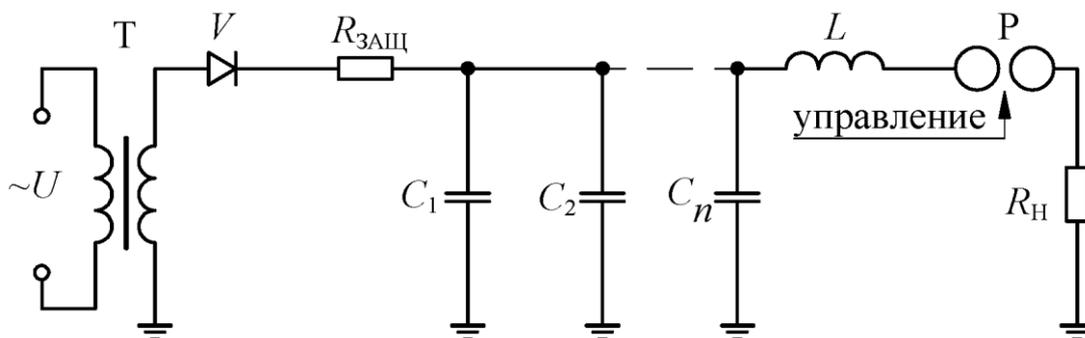


Рисунок 49 - Электрическая схема ГИТ

После срабатывания разрядника P батарея конденсаторов разряжается на сопротивление нагрузки. Например, в канал разряда после пробоя. Величина тока определяется, в первую очередь, индуктивностью и емкостью разрядного контура по формуле:

$$I_m = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (67)$$

где  $U_0$  – зарядное напряжение;

$L$  — индуктивность контура;

$C = n \cdot C_1$  (если  $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ ) — емкость разрядного контура.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Важов В.Ф., Лавринович В.А., Лопаткин Техника высоких напряжений / Курс лекций для бакалавров направления 140200 «Электроэнергетика» - Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 119 с.
2. Техника высоких напряжений/ И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова, Г. М. Иманов и др. Под ред. Г. С. Кучинского. — СПб.: Энергоатомиздат, 2003. — 608 с.
3. Техника высоких напряжений/ Под ред. Г. С. Кучинского. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1998. — 700 с.
4. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 464 с.
5. Техника высоких напряжений/ Под ред. Д. В. Разевига. - М.-Л.: Энергия, 1976. — 488 с.

Балашов Олег Петрович

## ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Учебное пособие для студентов специальности 140400 всех форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 03.07.12 Формат 60x84 /16.

Усл. печ. л. 3,38 . Тираж 150 экз. Заказ 121091. Рег. № 176.

Отпечатано в РИО Рубцовского индустриального института  
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/б.