

**А.А. Василенко**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Учебное пособие*

Красноярск 2018

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

**А.А. Василенко**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Рекомендовано учебно-методическим советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет» для внутривузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 (4.35.03.06) «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии в АПК»*

Красноярск 2018

ББК 30.3

В 19

*Рецензенты:*

*Д.А. Иванов, кандидат технических наук, доцент кафедры  
электрооборудования и электротехники ФГБОУ ВО  
«Иркутский государственный аграрный  
университет им. А.А. Ежевского»*

*Г.С. Тимофеев, кандидат технических наук, начальник службы  
электрических режимов ПО ЦУС филиала ПАО «МРСК Сибири» –  
«Красноярскэнерго»*

**Василенко, А.А.**

В 19 **Материаловедение. Электротехнические материалы:** учеб.  
пособие / А.А. Василенко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск,  
2018. – 151 с.

В пособии рассмотрены основные физические явления, происходящие в материалах при воздействии на них электромагнитных полей и различных факторов, виды электротехнических материалов и возможность их применения в электроэнергетическом оборудовании.

Предназначено для студентов Института инженерных систем и энергетики, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 (4.35.03.06) «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии в АПК» очной и заочной форм обучения.

ББК 30.3

© Василенко А.А., 2018

© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Материаловедение. Электротехнические материалы» изучает основные физические явления, происходящие в материалах при воздействии на них электромагнитных полей и различных факторов; виды электротехнических материалов и возможности их применения в основных видах электроэнергетического оборудования.

### **Задачи изучения дисциплины**

В результате изучения дисциплины студент должен решить задачи: по анализу классификации современных материалов, применяемых в электротехнических устройствах, взаимосвязи их состава, строения, основных свойств материалов с процессами, происходящими в них при воздействии электрического, магнитного полей и температуры, состава рабочей среды и других факторов, что является необходимой основой их рационального применения; по приобретению навыков испытания материалов и определения их основных характеристик.

Дисциплина нацелена на формирование общепрофессиональной компетенции ОПК-5 – способности обоснованно выбирать материал и способы его обработки для получения свойств, обеспечивающих высокую надежность детали.

В результате изучения дисциплины студент должен:

### ***Знать:***

- современные способы получения материалов и изделий из них с заданным уровнем эксплуатационных свойств;
- строение и свойства материалов;
- сущность явлений, происходящих в материалах в условиях эксплуатации изделий;

### ***Уметь:***

- оценивать и прогнозировать состояние материалов и причин отказов деталей под воздействием на них различных эксплуатационных факторов;
- выбирать рациональный способ получения заготовок исходя из заданных эксплуатационных свойств;

### ***Владеть:***

- методикой выбора конструкционных материалов для изготовления элементов машин и механизмов.

# МОДУЛЬ 1

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

### Цели и задачи изучения модуля 1

В этом разделе рассматриваются физические основы наиболее обширного класса электротехнических материалов – диэлектрических. Под диэлектрическими материалами понимают материалы, оказывающие весьма значительное сопротивление прохождению через них постоянного электрического тока; в этих материалах возможно существование сильных электрических полей. Наиболее часто диэлектрики используются в качестве электроизоляционных материалов.

После изучения модуля 1 вы будете знать:

- основные характеристики диэлектрических материалов;
- какие процессы происходят в диэлектриках при различных физических воздействиях;
- как меняются электрические характеристики диэлектриков при этих воздействиях.

После изучения модуля 1 вы будете уметь:

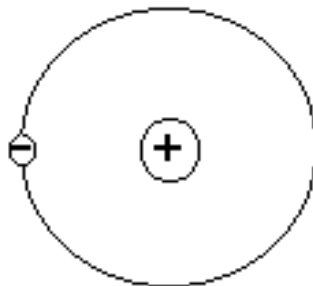
- выбирать характеристики диэлектрических материалов в соответствии с условиями их применения;
- определять электрические характеристики диэлектриков и проводить их испытания.

### 1.1 Строение вещества. Виды связи в веществе

Как известно из физики, любое вещество состоит из атомов и молекул. Атомом называется наименьшая частица химического элемента, обладающая его химическими свойствами. Атом состоит из положительно заряженного ядра и электронов, заполняющих оболочку атома. Заряд электрона  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. В атоме заряд ядра равен по абсолютной величине суммарному заряду всех его электронов. Ионом данного атома называется электрически заряженная частица, образующаяся при потере или приобретении электрона атомом.

Простейшей атомной системой является атом водорода (см. рис. 1.1), состоящий из одного электрона, движущегося в кулоновском

поле одного протона. От структуры электронной оболочки атомов зависят многие свойства веществ, представляющих собой по составу химические элементы.



*Рис. 1.1. Модель строения атома водорода по теории Бора*

Решающее влияние имеют внешние, наиболее удаленные от ядра электроны. Эти электроны слабее всех связаны с ядром и называются валентными электронами. Слой, в котором находятся эти электроны, называется валентным слоем. Количество электронов в этом слое определяет валентность элемента и его способность соединяться с другими элементами.

Атомы в свою очередь могут соединяться в молекулы. Молекулой называется наименьшая частица вещества, обладающая его химическими свойствами и состоящая из одинаковых или различных атомов или ионов.

Различают три основных вида связи между атомами в молекулах.

*Ковалентная связь* возникает при обобществлении электронов двумя соседними атомами. Например, атом хлора имеет на внешней оболочке (в валентной зоне) один электрон, а при соединении двух таких атомов в молекулу эти валентные электроны становятся общими.

Если рассмотреть модели атомов (см. рис. 1.2), то можно увидеть, что валентный электрон первого атома взаимодействует (притягивается) положительным ядром второго атома, а электрон второго атома – ядром первого атома. Это взаимодействие кулоновское, т. е. электрическое. Или, иначе, электрон первого ядра находится некоторое время у второго ядра и наоборот. Примерами ковалентных связей могут служить молекулы  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $C_2$ . Ковалентная связь существует не только у газов, например, алмаз представляет соединение атомов углерода (-C-C-), карборунд – углерода и кремния (-Si-C-).

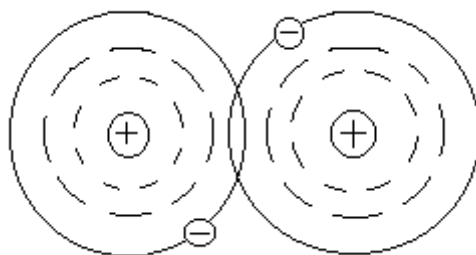


Рис. 1.2. Схематическое изображение двухатомной молекулы с ковалентной связью

Если атом отдает с внешней орбиты электрон, то он превращается в положительный ион. И наоборот, если атом присоединяет лишний электрон, он превращается в отрицательный ион.

*Ионная связь* образована силами притяжения между положительным и отрицательным ионами. При этом общая сумма положительных и отрицательных зарядов ионов в молекуле равна нулю. Силы, обеспечивающие притяжение атомов в ионных молекулах, имеют в основном электрическую природу.

Эта связь характерна для соединений неметаллов с металлами, например, ионов натрия  $\text{Na}^+$  и ионов хлора  $\text{Cl}^-$  или  $\text{KJ}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и т. д.

Ионная связь может существовать лишь для атомов различных химических элементов, так, ионы хлора  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Cl}^-$  не могут электрически притягиваться.

Молекулы бывают *нейтральные* и *полярные* (дипольные). Если центры тяжести положительных и отрицательных зарядов в молекуле совпадают, молекулу называют нейтральной. У полярных молекул эти центры не совпадают и образуют *диполь* (рис. 1.3).

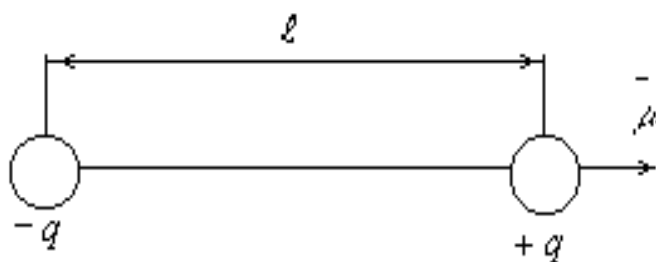


Рис. 1.3. Схематическое изображение диполя

Диполем называют два равных, но противоположных по знаку, заряда, центры которых смещены на некоторое расстояние, называемое плечом диполя. Полярные молекулы характеризует величина дипольного момента

$$\mu = q \cdot l, \quad (1.1)$$

где  $q$  – суммарный положительный заряд молекулы;

$l$  – плечо диполя.

Дипольный момент полярной молекулы, как и всякий электрический момент, является векторной величиной. При этом за направление вектора  $\vec{\mu}$  принимается направление от отрицательного заряда к положительному (как это показано на рис. 1.3).

В большинстве случаев собственный дипольный момент полярных молекул бывает порядка  $10^{-30}$  Кл·м, так как абсолютное значение заряда электрона  $|e| \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а плечо – порядка  $10^{-10}$  м.

Молекула типичного ионного соединения КJ (йодистый калий) имеет весьма большой электрический момент  $\mu = 23 \cdot 10^{-30}$  Кл·м. Направлен этот момент от отрицательного иона J к положительному иону K<sup>+</sup> (рис. 1.4, а)

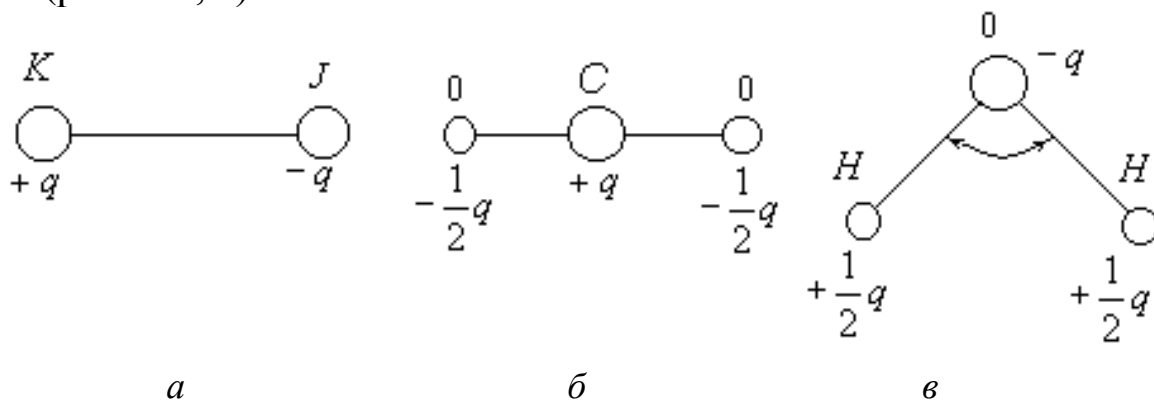


Рис. 1.4. Схема пространственного строения молекулы:  
а – йодистого калия KJ; б – углекислого газа CO<sub>2</sub>; в – воды H<sub>2</sub>O

По написанию химической формулы нельзя определить, полярные молекулы у данного вещества или нейтральные. Так, формулы углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и воды (H<sub>2</sub>O) в записях похожи, но углекислый газ имеет симметричное строение молекул (рис. 1.4, б) с  $\mu = 0$ , а вода – несимметричное с  $\mu = 6,1 \cdot 10^{-30}$  Кл·м (рис. 1.4, в). В результате молекулы углекислого газа нейтральны, а вода имеет резко выраженные полярные свойства.

Диэлектрики, состоящие из нейтральных молекул с  $\mu = 0$ , называют *неполярными*, а диэлектрики, состоящие из дипольных молекул с  $\mu > 0$ , – *полярными*.

Третий вид связи в веществе – *металлическая* связь. Это связь между положительно заряженными ионами, находящимися в узлах



кристаллической решетки, с общими для данного тела свободными электронами (рис. 1.5).

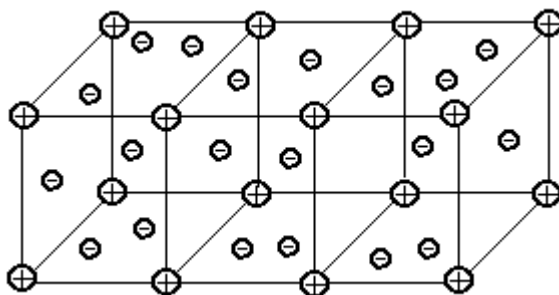


Рис. 1.5. Схема строения металлического проводника

Наличие свободных электронов приводит к высокой электропроводности металлов.

В общем можно сказать, что существует очевидная связь между типом связей атомов в молекулах и свойствами материалов.

Существовало представление, что молекулы являются очень малыми частицами. Это не всегда правильно, так как размеры молекул различных материалов различаются на много порядков. Некоторые молекулы действительно очень малы и их размеры сравнимы с размерами атомов. Например, размер молекулы воды имеет порядок  $2,7 \cdot 10^{-10}$  м. Но многие молекулы имеют макроскопические размеры. Кристаллы и терморезистивные пластмассы в отвержденном состоянии представляют собой гигантские макромолекулы.

## Контрольные вопросы

1. Какие силы удерживают атомы в молекулах?
2. Перечислите основные виды связи в веществе.
3. Чем отличаются нейтральные молекулы от полярных?

## 1.2 Поляризация диэлектриков

### 1.2.1 Электрическое поле

Если в пространстве существуют электрические силы, обнаруживающиеся при внесении в него электрических зарядов, то мы говорим, что в нем существует *электрическое поле*. Источником электрического поля является заряженное тело любой формы, неподвижное относительно измерителя.

Основной характеристикой электрического поля служит вектор *напряженности* электрического поля  $\vec{E}$ . Напряженность электрического поля характеризует силу, с которой поле действует на помещенный в него заряд  $q$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}. \quad (1.2)$$

Направления векторов  $\vec{E}$  в электрическом поле изображаются силовыми линиями напряженности. Так называются линии, в каждой точке которых вектор  $\vec{E}$  направлен по касательной. В зависимости от формы заряженных тел (электродов) и их взаимного расположения графики распределения силовых линий могут иметь самый различный вид (рис. 1.6).

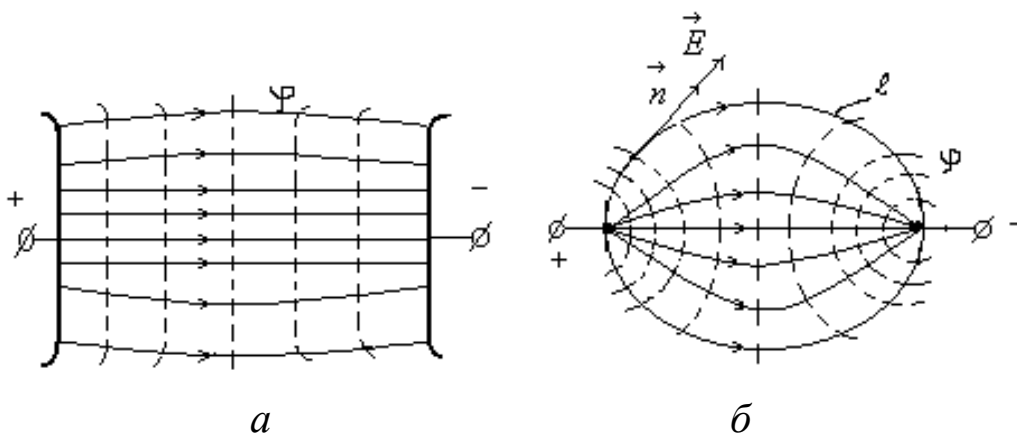


Рис. 1.6. Простейшие картины электрического поля

Силовые линии при этом проводятся нормально к поверхностям равного потенциала, называемым эквипотенциальными. Обычно силовые линии рисуются так, чтобы число силовых линий на единицу площади эквипотенциальной поверхности было в среднем равно  $\vec{E}$  в данной точке поля.

Напряженность поля  $\vec{E}$  в заданной точке равна скорости изменения потенциала, т. е. падению напряжения на единицу длины  $l$  вдоль силовой линии, и направлена в сторону снижения потенциала. Это выражается равенством

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dl} \cdot \vec{n}, \quad (1.3)$$

где  $\vec{n}$  – единичный вектор, направленный по силовой линии поля в данной точке (рис. 1.6, б).

## 1.2.2 Поляризация диэлектриков в электрическом поле

Одним из важнейших свойств диэлектриков является их способность *поляризоваться* под действием внешнего электрического поля. Понятие поляризации впервые было введено М. Фарадеем еще в тридцатых годах XIX века. Фарадей проводил простые опыты с помощью электроскопа и конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин. Его опыты показали, что если между пластинами поместить изолятор (диэлектрик), то емкость такого конденсатора возрастет в  $\varepsilon_r$  раз. Причем  $\varepsilon_r$  зависит только от свойств изоляционного материала.

Эта величина  $\varepsilon_r$  получила название *относительной диэлектрической проницаемости*.

Относительная диэлектрическая проницаемость представляет собой отношение заряда  $Q$  при некотором напряжении на конденсаторе, изготовленном из данного диэлектрика, к заряду  $Q_0$ , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум

$$\varepsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_\partial}{Q_0} = 1 + \frac{Q_\partial}{Q_0}, \quad (1.4)$$

где  $Q_\partial$  – дополнительный заряд, обусловленный поляризацией вещества.

Учитывая, что заряд конденсатора

$$Q = C \cdot U, \quad (1.5)$$

можно получить еще одну формулу, выражающую  $\varepsilon_r$  через значения емкостей:

$$\varepsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} \frac{U}{U} = \frac{C}{C_0}, \quad (1.6)$$

где  $C$  – емкость конденсатора с диэлектриком;

$C_0$  – емкость конденсатора, когда между его обкладками находится вакуум.

Из формулы (1.4) следует: чем интенсивней процессы поляризации в диэлектрике, тем больше дополнительный заряд  $Q_\partial$  и соответственно больше  $\varepsilon_r$ . Поэтому относительная диэлектрическая прони-

цаемость характеризует интенсивность процессов поляризации, протекающих в диэлектриках под действием приложенного электрического поля. Выясним, в чем заключается физическая сущность поляризации диэлектриков.

В предыдущей главе было показано, что в диэлектрике всегда имеются связанные между собой электрические заряды. Такими связанными зарядами являются ядро атома и электроны; положительные и отрицательные ионы, входящие в состав молекул, и дипольные молекулы, у которых электрические центры разноименных зарядов не совпадают. При воздействии электрического поля связанные электрические заряды смещаются друг относительно друга, а дипольные молекулы еще и ориентируются (занимают определенное положение) в соответствии с направлением действия поля.

Это явление смещения связанных зарядов и ориентации дипольных молекул, происходящее в диэлектрике под действием внешнего электрического поля, получило название поляризации. Поляризация приводит к образованию некоторого электрического момента как у каждой отдельной поляризующейся частицы (атома, иона, молекулы), так и у всего объема диэлектрика (рис. 1.7). При этом внутри диэлектрика существует два электрических поля: поле с напряженностью  $\vec{E}_0$ , созданное пластинами, и поле с напряженностью  $\vec{E}_n$ , созданное поляризационным зарядом диэлектрика  $Q_d$  (рис. 1.7).

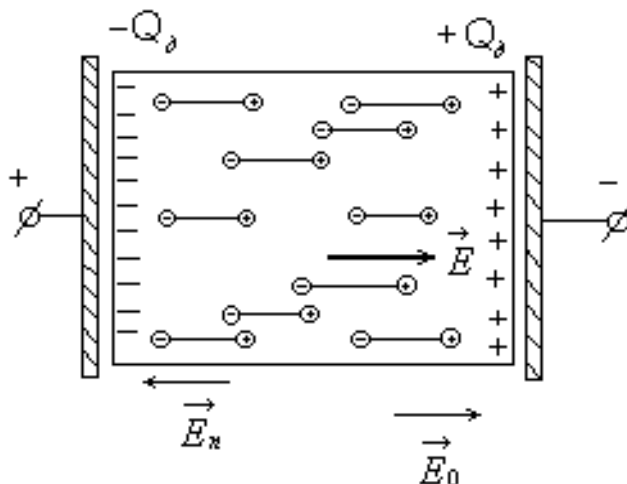


Рис. 1.7. Схематическое изображение поляризованного диэлектрика

Суммарное поле этих двух источников определяется вектором напряженности

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_n. \quad (1.7)$$

Но поскольку векторы  $\vec{E}_o$  и  $\vec{E}_n$  направлены в противоположные стороны, модуль  $\vec{E}$  может быть найден как разность модулей  $|\vec{E}_o|$  и  $|\vec{E}_n|$

$$|\vec{E}| = |\vec{E}_o| - |\vec{E}_n|. \quad (1.8)$$

Отсюда следует, что поляризация приводит к уменьшению напряженности электрического поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом. Причем можно доказать, что уменьшение результирующего поля в диэлектрике зависит только от относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  материала, а именно

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_o}{\epsilon_r}. \quad (1.9)$$

### 1.2.3 Основные виды поляризации диэлектриков

Существует большое число различных физических механизмов поляризации. Отметим из них лишь некоторые, наиболее типичные.

*Электронная поляризация* – смещение и деформация орбит электронов относительно атомных ядер (рис. 1.8, а).

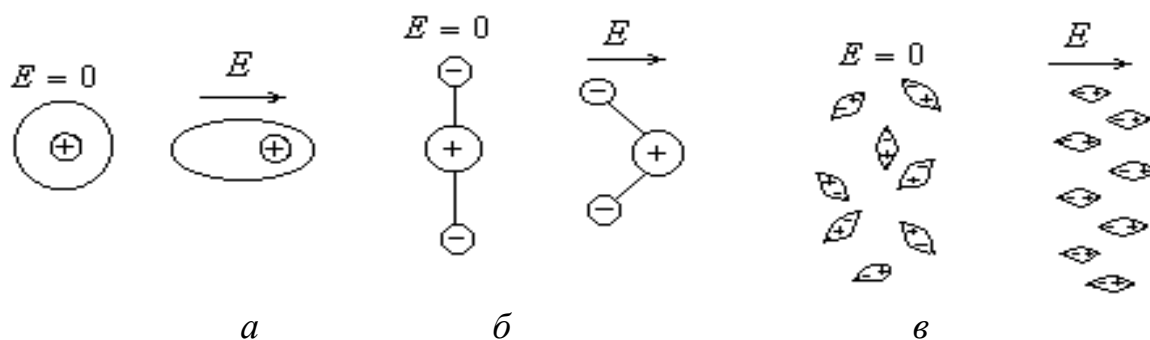


Рис. 1.8. Схематическое изображение различных видов поляризации

Электронная поляризация устанавливается при приложении внешнего электрического поля за чрезвычайно короткое время (порядка  $10^{-15}$  с). Она наблюдается у всех диэлектриков независимо от наличия в них других видов поляризации. Энергия, затраченная на электронную поляризацию, полностью (т. е. без потерь) освобождается в процессе разряда после снятия электрического поля. Поэтому

электронная поляризация создает в диэлектрике только реактивный емкостный ток.

*Ионная поляризация* – смещение относительно друг друга ионов, образующих молекулы (рис. 1.8, б). Эта поляризация характерна для диэлектриков, имеющих ионную структуру, и протекает тоже за весьма малые промежутки времени с начала воздействия напряжения (порядка  $10^{-13}$  с). Как и электронная, она создает в диэлектрике чисто реактивный ток.

*Дипольная поляризация* – поворот (ориентация) дипольных молекул в полярных диэлектриках (рис. 1.8, в). Она принадлежит к числу релаксационных (ослабевающих) видов поляризации и происходит относительно медленно, так как поворот диполей по полю требует преодоления сил трения в диэлектрике. Поэтому дипольная поляризация сопровождается необратимыми активными потерями электрической энергии.

*Миграционная, или структурная, поляризация* проявляется в твердых диэлектриках с неоднородной структурой. Наличие макроскопических неоднородностей в структуре диэлектрика (примесей, включений или участков с различной проводимостью) приводит к тому, что при воздействии электрического поля электроны и ионы включений перемещаются в них, образуя большие поляризационные области (рис. 1.9).

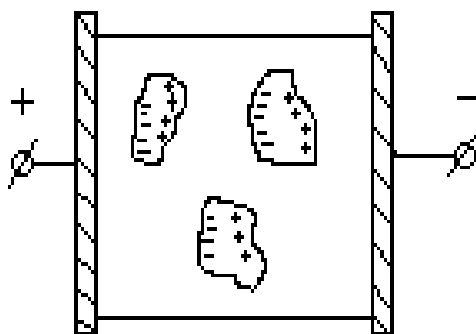


Рис. 1.9. Поляризация в неоднородностях структуры

*Спонтанная (самопроизвольная) поляризация* присуща особому классу диэлектриков – сегнетоэлектрикам. Эти кристаллические вещества состоят из отдельных самопроизвольно поляризованных областей *доменов*, представляющих собой элементарные ячейки кристаллической решетки. Под влиянием приложенного поля происходит ориентация дипольных моментов доменов, вызванная искажени-

ем кристаллической решетки. Это приводит к созданию очень большого суммарного электрического момента, к большому поляризационному заряду и большому емкостному току.

### 1.2.4 Поляризация комбинированных диэлектриков

На практике в электрической изоляции очень часто используются комбинации различных диэлектриков. В этих случаях поляризованность в слоях диэлектрика будет различной. При этом важно знать, как повлияет относительная диэлектрическая проницаемость слоев на распределение напряженности поля в диэлектрике. Чтобы это выяснить, рассмотрим конденсатор с различными диэлектрическими материалами, слои которых соединены последовательно друг с другом (рис. 1.10).

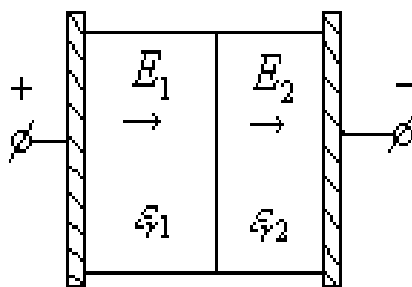


Рис. 1.10. Электрическое поле в плоском двухслойном конденсаторе

Действие электрического поля на диэлектрик характеризуют вектором *электрического смещения* (электрической индукцией), (Кл/м<sup>2</sup>)

$$\bar{D} = \varepsilon_r \cdot \bar{E}. \quad (1.10)$$

Электрическое смещение численно равно заряду, индуцируемому на одном квадратном метре проводящей поверхности, внесенной в диэлектрик перпендикулярно вектору  $\bar{E}$ .

Для двухслойного диэлектрика электрическое смещение в слоях будет равно:

$$D_1 = \varepsilon_{r1} E_1 \quad \text{и} \quad D_2 = \varepsilon_{r2} E_2. \quad (1.11)$$

Если мысленно поставить проводящую пластину на границе раздела двух диэлектриков, то заряд, индуцируемый на ней, будет общим для обоих слоев, а следовательно, и  $D_1 = D_2$ .

Тогда, с учетом (1.11), можно записать

$$\varepsilon_{r1} \cdot E_1 = \varepsilon_{r2} \cdot E_2 \quad (1.12)$$

или

$$\frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} = \frac{E_2}{E_1}. \quad (1.13)$$

Из полученного выражения (1.13) следует важное правило, что напряженность в слоях диэлектрика распределяется обратно пропорционально диэлектрической проницаемости слоев.

Таким образом, слои диэлектриков с большей  $\varepsilon_r$  стремятся разгрузиться и переложить часть электрической напряженности на слои с меньшей  $\varepsilon_r$ . В особенно невыгодном положении оказываются воздушные прослойки внутри изоляции (или между изоляцией и электродами при неплотном прилегании последних). Из-за малой  $\varepsilon_r$  и, соответственно, высокой напряженности в таких прослойках легко возникает ионизация и происходят частичные разряды.

### 1.2.5 Диэлектрическая проницаемость газов

Газы характеризуются малой плотностью, т. е. малым числом молекул в единице объема. Поэтому поляризация в газах проявляется слабо, а диэлектрическая проницаемость всех газов незначительна и близка к единице. В неполярных газах в основном наблюдается электронная поляризация, в полярных к ней добавляется дипольная поляризация. Чем больше радиус молекул газа, тем выше их поляризуемость и больше диэлектрическая проницаемость.

И все равно диэлектрическая проницаемость у газов близка к единице, так, для воздуха  $\varepsilon_r = 1,00058$ .

С ростом давления диэлектрическая проницаемость газов возрастает, так как увеличивается число молекул в единице объема и большее число частиц поляризуется.

С ростом температуры газы расширяются, уменьшается число поляризуемых частиц в единице объема, и это приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости.



Температурная зависимость характеризуется *температурным коэффициентом* диэлектрической проницаемости ( $K^{-1}$ )

$$TK\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \frac{d\varepsilon_r}{dt} . \quad (1.14)$$

Этот коэффициент представляет собой относительное изменение  $\varepsilon_r$  при повышении температуры на один градус.

Например, для воздуха при температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$TK\varepsilon = -2 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1} ,$$

что говорит о несущественной температурной зависимости.

### 1.2.6 Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики, в зависимости от вида молекул, делят на *неполярные* и *полярные*. У неполярных диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r \leq 2,5$ , а у полярных – выше 3. Например, у совола  $\varepsilon_r$  более 5, так как в них, кроме электронной и ионной, проявляется и дипольная поляризация.

У неполярных жидкостей с ростом температуры происходит слабое снижение диэлектрической проницаемости (рис. 1.11, а), что объясняется расширением жидкости и уменьшением числа поляризуемых молекул в единице объема. При температуре кипения ( $t_{кип}$ ) жидкость испаряется и  $\varepsilon_r$  стремится к единице.

Поскольку в неполярных жидкостях происходят только мгновенные виды поляризации (электронная и ионная), то при любой частоте приложенного поля молекулы и атомы успевают полностью поляризоваться. В результате диэлектрическая проницаемость у таких жидкостей не зависит от частоты (рис. 1.11, б).

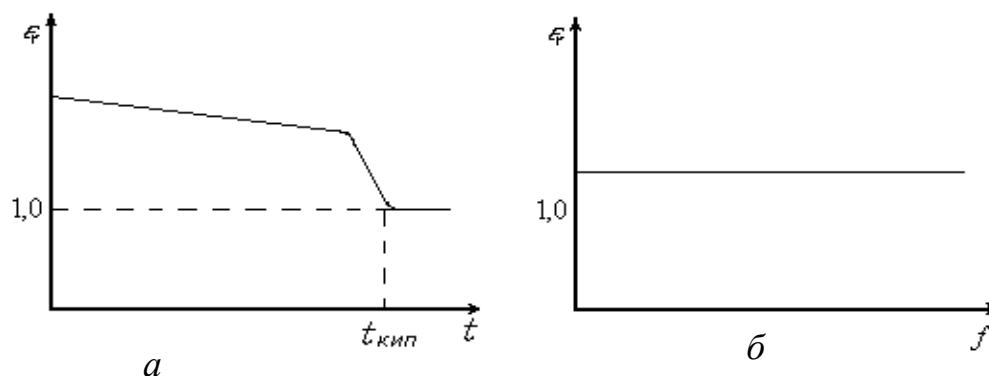


Рис. 1.11. Зависимость диэлектрической проницаемости неполярной жидкости: а – от температуры; б – от частоты

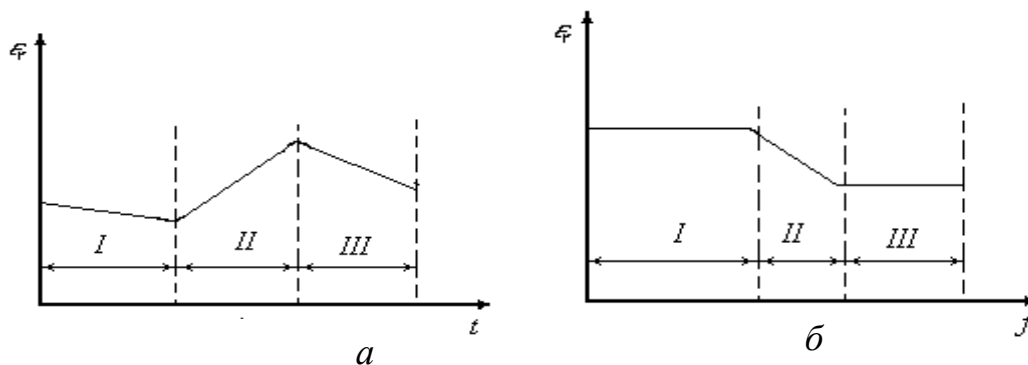


Рис. 1.12. Характерные зависимости диэлектрической проницаемости полярной жидкости: а – от температуры; б – от частоты

У полярных жидких диэлектриков зависимость  $\epsilon_r$  от температуры достаточно сложная (рис. 1.12, а).

Так, на участке I, т. е. в области низких температур, диполи не могут ориентироваться по полю, так как они «заморожены». С увеличением температуры уменьшается вязкость жидкости и диполи легче разворачиваются при приложении поля, тем самым обуславливая рост  $\epsilon_r$  (участок II). На участке III с ростом температуры становится интенсивным тепловое движение диполей, что мешает их ориентации вдоль силовых линий напряженности. Это и приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости.

При низких частотах в полярных жидкостях диполи легче успевают ориентироваться при изменениях направления поля. В результате диэлектрическая проницаемость на участке I имеет большие значения (рис. 1.12, б). На участке II диэлектрическая проницаемость резко уменьшается, т. е. диполи с увеличением частоты все хуже успевают ориентироваться по полю. И, наконец, на участке III частота настолько велика, что диполи не успевают ориентироваться по полю и дипольная поляризация полностью исчезает. При таких частотах  $\epsilon_r$  определяется лишь быстрыми видами поляризации.

### 1.2.7 Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

У твердых диэлектриков диэлектрическая проницаемость принимает самые различные значения из-за разнообразия структуры материалов. В твердых телах возможны все виды поляризации и диапазон изменения  $\epsilon_r$  составляет от 2,0 до  $10^6$ .

У твердых неполярных диэлектриков с увеличением температуры диэлектрическая проницаемость в большинстве случаев растет. Это объясняется тем, что при повышении температуры ослабляются упругие связи между ионами, что облегчает их смещение и усиливает ионную поляризацию (рис. 1.13, кривая 1).

Однако благодаря термическому расширению вещества уменьшается количество молекул в единице объема, поэтому у некоторых материалов происходит уменьшение  $\epsilon_r$  с ростом температуры (рис. 1.13, кривая 2).

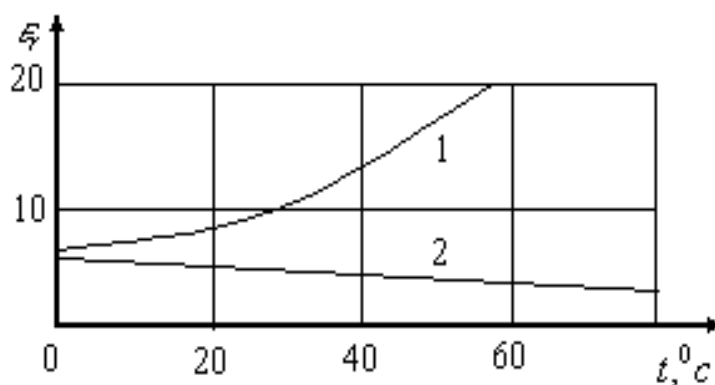


Рис. 1.13. Зависимости  $\epsilon_r$  от температуры для неполярных диэлектриков: 1 – электрофарфор; 2 – полистирол

У твердых полярных диэлектриков температурная зависимость диэлектрической проницаемости аналогична зависимости для полярных жидкостей (см. рис. 1.12, а).

Наиболее сильно выражена температурная зависимость диэлектрической проницаемости у сегнетоэлектриков. Типичный характер этой зависимости показан на рисунке 1.14. Для зависимости характерен максимум в так называемой точке Кюри ( $T_c$ ). При превышении температуры  $T_c$  тепловое движение атомов и молекул нарушает поляризованность доменов и спонтанная поляризация затухает.

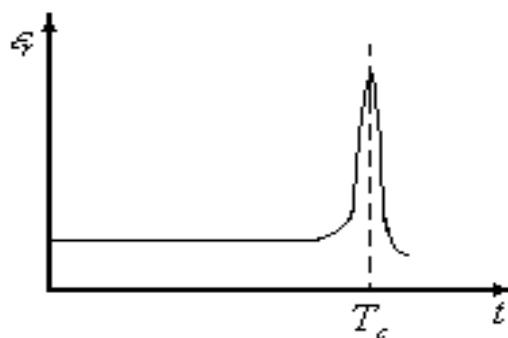


Рис. 1.14. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры

Зависимости диэлектрической проницаемости от частоты у твердых диэлектриков аналогичны зависимостям у жидких. Для неполярных диэлектриков характерная зависимость приведена на рисунке 1.11, б; а для полярных – на рисунке 1.12, б.

### Контрольные вопросы

1. Каким показателем характеризуют электрические поля?
2. Что такое поляризация? Перечислите виды поляризации.
3. Что такое относительная диэлектрическая проницаемость?
4. Какие процессы в диэлектрике характеризуются относительной диэлектрической проницаемостью?
5. Как влияет поляризация на напряженность электрического поля в диэлектрике?
6. Как распределяется напряженность электрического поля в двухслойном диэлектрике?
7. Объясните температурную зависимость диэлектрической проницаемости полярной жидкости.

## 1.3 Электропроводность диэлектриков

### 1.3.1 Основные понятия

Если к любому диэлектрику приложить постоянное напряжение и при этом замерять протекающий через него ток, то можно получить зависимость тока утечки ( $i_{ут}$ ) от времени приложения напряжения (см. рис. 1.15).

Ток утечки представляет собой сумму двух токов

$$i_{ут} = i_{абс} + i_{ск}, \quad (1.15)$$

где  $i_{абс}$  – ток абсорбции;

$i_{ск}$  – сквозной ток, или ток сквозной проводимости.

Ток абсорбции обусловлен быстрыми поляризационными процессами, происходящими с момента приложения напряжения. Он быстро затухает с течением времени. Сквозной ток обусловлен наличием хотя бы небольшого числа свободных зарядов, имеющих в реальных диэлектриках. Как видно из рисунка 1.15, после завершения процессов поляризации через диэлектрик протекает только сквозной ток.

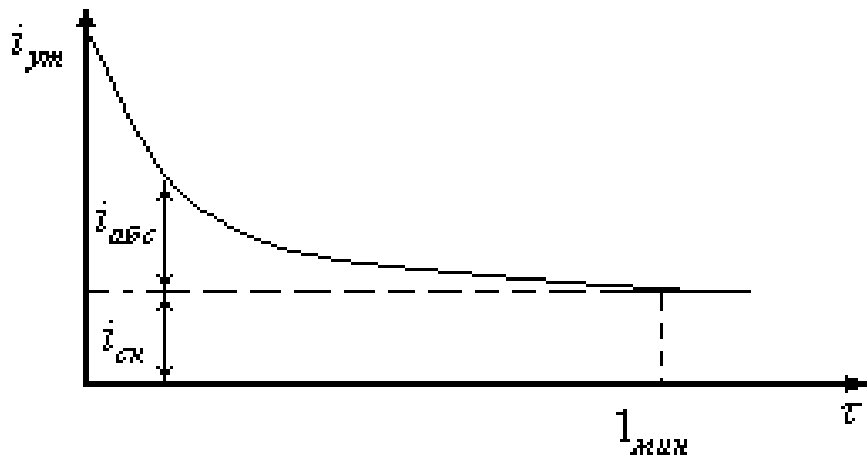


Рис. 1.15. Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени

Если хотят определить сопротивление диэлектрика (изоляции), то токи абсорбции не учитывают и тогда

$$R_{из} = \frac{U}{i_{ск}}, \quad (1.16)$$

где  $U$  – приложенное напряжение;

$i_{ск}$  – сквозной ток, взятый через одну минуту после начала приложения напряжения.

Величина, обратная сопротивлению изоляции, называется проводимостью

$$G_{из} = \frac{1}{R_{из}}. \quad (1.17)$$

Поскольку ток утечки протекает и через объем и по поверхности диэлектрика, необходимо различать объемное и поверхностное сопротивление или проводимость. Для сравнительной оценки различных диэлектриков определяют значения *удельного объемного сопротивления*  $\rho$  и *удельного поверхностного сопротивления*  $\rho_s$  или соответствующие им удельные проводимости.

Удельное объемное сопротивление равно сопротивлению куба из данного материала с ребром в 1 м, если ток проходит от одной грани до противоположной, умноженному на единицу длины.

Для плоского образца материала в однородном поле (см. рис. 1.16) удельное объемное сопротивление (Ом·м) рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{R \cdot S}{h}, \quad (1.18)$$

где  $R$  – объемное сопротивление образца, Ом;

$S$  – площадь электрода, м<sup>2</sup>;

$h$  – толщина образца, м.

Удельная объемная проводимость  $\gamma$  измеряется в сименсах на метр и определяется по формуле

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (1.19)$$

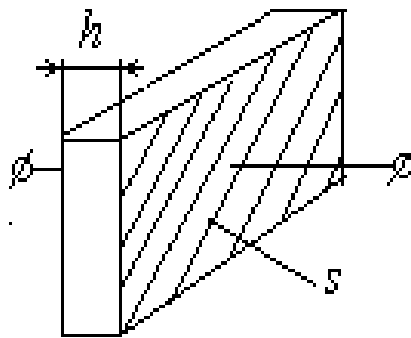


Рис. 1.16. К определению объемного сопротивления плоского образца

Удельное поверхностное сопротивление равно сопротивлению квадрата (любых размеров) на поверхности материала, если ток проходит через квадрат от одной его стороны к противоположной.

Удельное поверхностное сопротивление (в Омах) для системы электродов, показанной на рисунке 1.17, рассчитывается по формуле

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{l}, \quad (1.20)$$

где  $R_s$  – поверхностное сопротивление образца материала, Ом;

$d$  – ширина электродов;

$l$  – расстояние между электродами.

Удельная поверхностная проводимость  $\gamma_s$  измеряется в сименсах и определяется по формуле

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}. \quad (1.21)$$

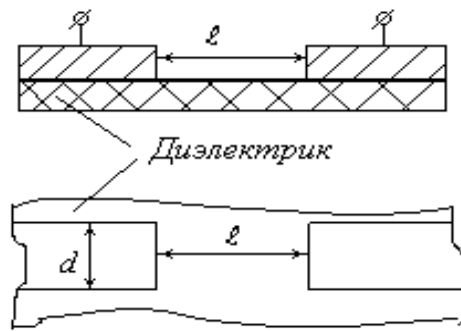


Рис. 1.17. К определению поверхностного сопротивления между двумя электродами с параллельными друг другу кромками

Электропроводимость диэлектрических материалов зависит от влажности и температуры окружающей среды. Наличие загрязнений также вызывает повышение электропроводности.

Удельное объемное сопротивление различных диэлектриков колеблется в пределах  $10^7$ – $10^{20}$  Ом·м; удельное поверхностное сопротивление  $10^7$ – $10^{10}$  Ом.

### 1.3.2 Физическая природа электропроводности диэлектриков

Электропроводность диэлектриков объясняется наличием в них свободных заряженных частиц: ионов, молионов (коллоидных частиц), иногда электронов.

Образование свободных носителей заряда в диэлектриках происходит по-разному в слабых и сильных электрических полях. Кроме того, имеются различия в механизме электропроводности в слабых электрических полях в диэлектриках, находящихся в газообразном, жидком и твердом агрегатных состояниях.

В слабых электрических полях причиной возникновения свободных носителей заряда в подавляющем большинстве диэлектриков является диссоциация загрязнений и примесей. Диссоциацией называется распад молекул растворенного вещества на положительно и отрицательно заряженные ионы.

Поэтому для многих диэлектрических материалов характерна *ионная электропроводность*, связанная с переносом ионов, т. е. явлением электролиза. Даже весьма малое количество загрязнений (примесей воды, солей, кислот, щелочей и пр.) способно заметно влиять на проводимость диэлектрика. Поэтому при создании электрической изоляции важное значение имеет чистота исходных материалов и чистота рабочего места.

В ряде случаев электролизу при прохождении через диэлектрик свободного тока утечки подвергается основное вещество диэлектрика. Примером может служить обычное стекло, в котором, благодаря его прозрачности, можно непосредственно наблюдать образование и перенос продуктов электролиза. При пропускании постоянного тока через стекло, нагретое для повышения проводимости, у катода образуются древовидные отложения (дендриты), входящие в состав молекул стекла металлов, прежде всего натрия.

У диэлектриков с ионным характером электропроводности соблюдается первый закон Фарадея: количество выделившегося при электролизе вещества пропорционально количеству прошедшего через материал электричества.

Ионная электропроводность может наблюдаться у кристаллических диэлектриков, однако она особенно характерна для аморфных веществ – смол, лаковых пленок, компаундов (специальных заливочных и пропиточных материалов), стекол и ряда других веществ, широко распространенных в технике электрической изоляции, а также для жидких диэлектриков.

*Молионная* (электрофоретическая) *электропроводность* наблюдается в коллоидных системах, которые представляют собой тесную смесь двух веществ (фаз), причем одна фаза (дисперсная фаза) в виде мелких частиц вещества равномерно взвешена в другой. Из коллоидных систем в электроизоляционной технике наиболее часто встречаются *эмульсии* (обе фазы – жидкости) и *суспензии* (дисперсная фаза – твердое вещество, находящееся в жидкости). Стабильность коллоидных систем объясняется наличием на поверхности частиц дисперсной фазы электрических зарядов (молионов). При воздействии на коллоидную систему электрического поля молионы приходят в движение, что проявляется как явление *электрофореза*. При электрофорезе, в отличие от электролиза, не наблюдается образования новых веществ, а лишь меняется относительная концентрация дисперсной фазы в различных частях объема системы. Молионная электропроводность наблюдается у жидких лаков, компаундов, увлажненных масел и т. п.

В некоторых случаях в диэлектрических материалах наблюдается *электронная электропроводность*, когда носителями зарядов являются свободные электроны. Так, рутит  $TiO_2$ , ряд титанатов ( $BaTiO_3$ ,  $CaTiO_3$ ,  $SrTiO_3$ ) и другие обнаруживают электронный характер электропроводности. Электронная электропроводность, наряду с ионной, характерна и для газообразных диэлектриков.



При повышении температуры удельное сопротивление диэлектрических материалов, как правило, существенно уменьшается (рис. 1.18). Это объясняется снижением вязкости вещества при повышении температуры.

Кроме того, происходит повышение числа свободных носителей зарядов, вызванное ускорением диссоциации молекул при повышении температуры диэлектрика.

Поэтому на практике сопротивление изоляции электрических машин, аппаратов, печей и т. п. при рабочих температурах много ниже, чем при нормальной температуре.

При весьма низких температурах, наоборот, даже низкокачественные (в обычных условиях) диэлектрики приобретают высокие значения сопротивления.

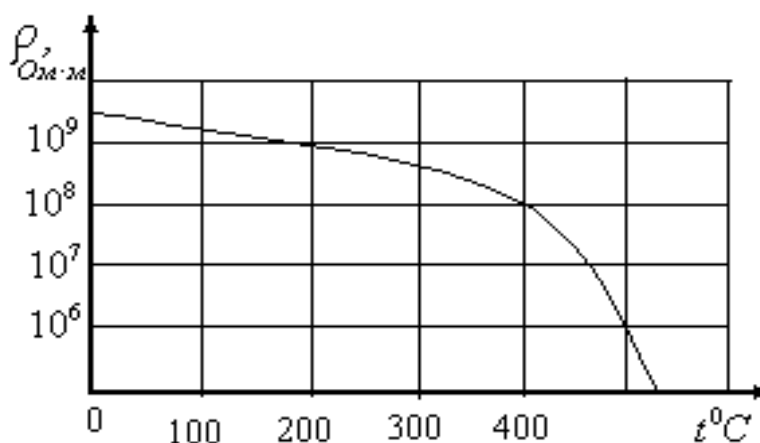


Рис. 1.18. Зависимость удельного объемного сопротивления  $\rho$  стеклоэмали от температуры

Присутствие даже малых количеств воды способно значительно уменьшить сопротивление диэлектрика. Это объясняется тем, что растворимые в воде примеси диссоциируют на ионы. В некоторых случаях влияние увлажнения может способствовать диссоциации молекул основного вещества диэлектрика. Таким образом, условия работы электрической изоляции становятся более тяжелыми также и при увлажнении.

### 1.3.3 Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков

Поверхностная электропроводность обусловлена присутствием влаги или загрязнений на поверхности диэлектрика. Вода отличается значительной удельной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя

влаги на поверхности диэлектрика, чтобы была обнаружена заметная проводимость, определяемая в основном толщиной этого слоя. Однако, поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, поверхностную электропроводность обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика.

Зависимость удельной поверхностной проводимости от влажности обуславливается наличием на поверхности диэлектрика диссоциирующих на ионы веществ; вода, адсорбируемая поверхностью, способствует этому. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то путем их удаления можно получать высокие значения удельного поверхностного сопротивления при любой влажности воздуха. Если вещества, диссоциирующие на ионы, являются составной частью материала, то удельное поверхностное сопротивление будет сильно снижаться при увеличении влажности.

Удельное поверхностное сопротивление тем выше, чем меньше полярность вещества, чем чище поверхность диэлектрика и чем лучше она отполирована. Наиболее высокими значениями удельного поверхностного сопротивления обладают неполярные диэлектрики, поверхность которых не смачивается водой.

Для повышения  $\rho_s$  диэлектриков применяют (в зависимости от вида диэлектрика) различные приемы: полировку поверхности материала, промывку поверхности кипящей дистиллированной водой, прогрев материала при достаточно высокой температуре, покрытие поверхности лаками, глазурями и т. п.

### **Контрольные вопросы**

1. Как выглядит временная зависимость тока утечки, протекающего через диэлектрик? Чем обусловлены составляющие этого тока?
2. Какими удельными показателями характеризуют электропроводность диэлектриков?
3. Чем обусловлена электропроводность диэлектриков?
4. Почему с ростом температуры удельные сопротивления диэлектриков уменьшаются?
5. От чего зависит поверхностная электропроводность диэлектриков?

## 1.4 Диэлектрические потери

### 1.4.1 Основные понятия

При воздействии электрического поля на диэлектрик в нем будет происходить рассеяние электрической энергии.

*Диэлектрическими потерями* называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика. Этот нагрев приводит к ухудшению важнейших свойств материала и к ускорению процессов его старения. В силовой электротехнике нагрев ведет к уменьшению электрической прочности, а вследствие этого, и к уменьшению надежности работы оборудования.

С физической точки зрения различают три главных процесса, следствием которых являются диэлектрические потери.

Главным процессом, вызывающим диэлектрические потери, является процесс электропроводности. Вызванные этим потери в диэлектрике называются *потерями на электропроводность*. Они возникают во всех диэлектриках. Больше всего они проявляются при повышенных температурах.

К потерям на электропроводность добавляются *потери на поляризацию*. Протекающие во времени процессы перераспределения зарядов, связанные с поляризацией, часто требуют преодоления сил внутреннего трения вещества, что и связано с затратой части электрической энергии и превращением ее в теплоту.

В области сильных электрических полей к указанным процессам добавляются *потери на ионизацию*, которые возникают при ионизации атомов и молекул диэлектрика или примесей под действием приложенного электрического поля.

Процессы электропроводности, поляризации и ионизации при анализе диэлектрических потерь считаются независимыми. При этом предполагается, что общие диэлектрические потери являются суммой составляющих, вызванных отдельными механизмами потерь.

Диэлектрические потери при постоянном напряжении значительно меньше, чем при переменном, так как при постоянном напряжении отсутствует периодическая поляризация диэлектрика и не проявляются потери на поляризацию.

Поэтому при постоянном напряжении качество диэлектрика характеризуют значениями удельных объемного и поверхностного со-

противлений, а диэлектрические потери определяют, как правило, при переменном напряжении.

Чаще всего для оценки способности диэлектрика рассеивать мощность в электрическом поле пользуются углом диэлектрических потерь или тангенсом этого угла. Для определения этих величин необходимо научиться правилам построения векторных диаграмм для синусоидальных функций.

### 1.4.2 Векторное представление синусоидальных величин

В теоретических основах электротехники распространено представление синусоидальных величин токов и напряжений в виде векторов, вращающихся с круговой частотой  $\omega = 2\pi f$  против часовой оси и имеющих соответствующие значения фазы  $\psi$  (рис. 1.19).

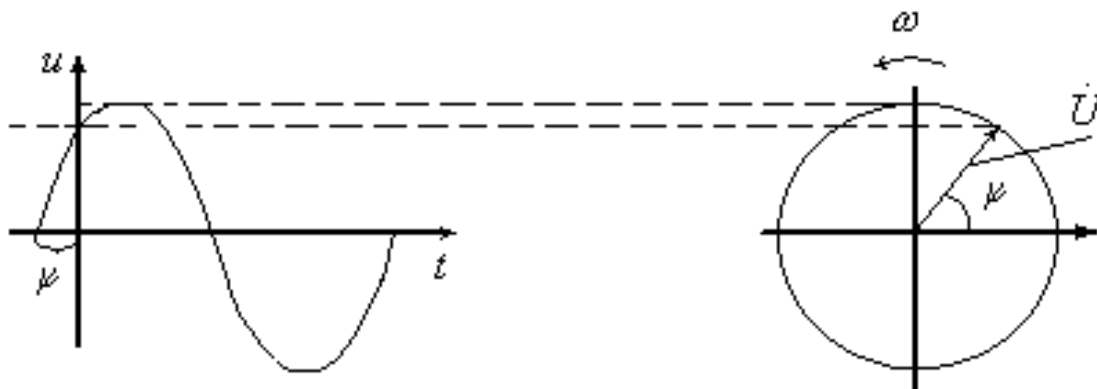


Рис. 1.19. Пример векторного представления синусоидально изменяющегося напряжения

Такое представление позволяет получать результаты сложения и вычитания синусоидальных величин в гораздо более простом виде сложения и вычитания соответствующих векторных величин на векторной диаграмме. Векторная диаграмма представляет собой совокупность векторов, изображающих собой синусоидально изменяющиеся функции одной и той же частоты  $f$ , построенные с соблюдением правил ориентации относительно друг друга по фазе.

Поскольку при воздействии электрического поля через диэлектрик протекают активный и емкостный токи, рассмотрим векторные диаграммы для соответствующих электрических цепей с активным и емкостным сопротивлениями.

При включении активного сопротивления  $R$  на синусоидальное напряжение  $u = U_m \cdot \sin \omega t$  ток, протекающий через него, определится по закону Ома

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t. \quad (1.22)$$

Из формулы 1.22 следует, что ток, протекающий через активное сопротивление, совпадает по фазе с приложенным напряжением (рис. 1.20, а). При этом векторы тока и напряжения, показанные на векторной диаграмме (рис. 1.20, б), будут совпадать по направлению.

Если приложить синусоидальное напряжение  $u = U_m \cdot \sin \omega t$  к конденсатору, то по синусоидальному закону будет меняться и заряд конденсатора

$$q = Cu = C U_m \cdot \sin \omega t. \quad (1.23)$$

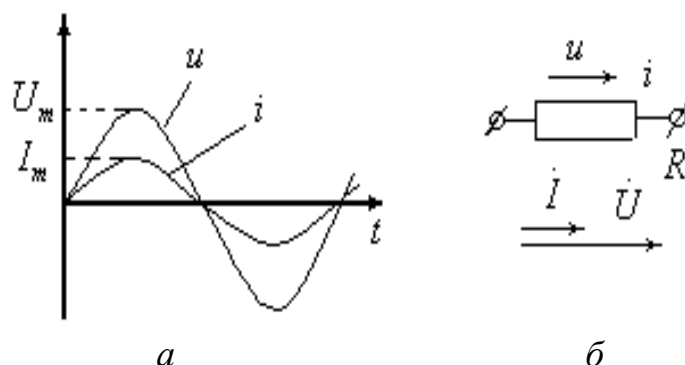


Рис. 1.20. Графики изменения тока и напряжения: а – на активном сопротивлении; б – соответствующая им векторная диаграмма

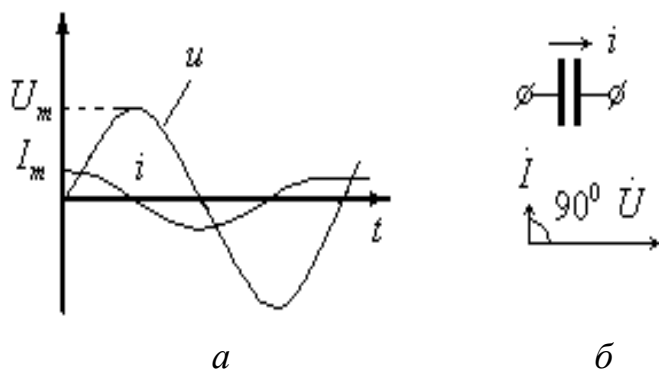


Рис. 1.21. Графики изменения тока и напряжения: а – на конденсаторе; б – соответствующая им векторная диаграмма

При этом конденсатор будет периодически перезаряжаться. Периодическая перезарядка конденсатора вызовет протекание через него зарядного тока

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot (CU_m \cdot \sin \omega t) = \omega CU_m \cdot \cos \omega t = \\
 &= \omega CU_m \cdot \sin \omega t(\omega t + 90^\circ) = I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ).
 \end{aligned}
 \tag{1.24}$$

Из формулы (1.24) видно, что ток через конденсатор по фазе опережает положенное напряжение на  $90^\circ$  (см. рис. 1.21, а). Поэтому и на векторной диаграмме (см. рис. 1.21, б) вектор тока, протекающего через конденсатор, опережает приложенное напряжение на  $90^\circ$ .

Через реальный диэлектрик с диэлектрическими потерями при воздействии переменного напряжения протекает ток  $I$ , имеющий две составляющие: активную  $I_a$  и реактивную (емкостную)  $I_c$ . Поэтому эквивалентная схема с потерями может быть представлена в виде параллельно соединенных конденсатора и активного сопротивления (рис. 1.22, а).

Для такой схемы местоположение вектора тока  $\dot{I}$  на векторной диаграмме (рис. 1.22, б) определится геометрическим сложением вектора  $\dot{I}_a$ , совпадающего по фазе с приложенным напряжением, и вектора  $\dot{I}_c$ , опережающего по фазе напряжение на  $90^\circ$ .

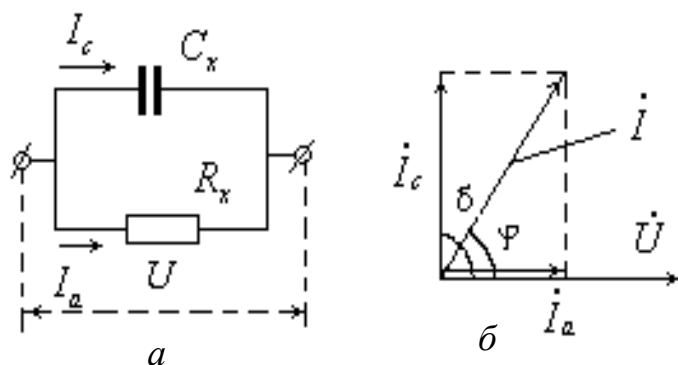


Рис. 1.22. Эквивалентная схема замещения и векторная диаграмма диэлектрика с потерями

Углом диэлектрических потерь называют угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз  $\varphi$  между током  $\dot{I}$ , протекающим через диэлектрик, и приложенным к нему напряжением  $U$ .

Угол диэлектрических потерь – важный параметр как материала диэлектрика, так и электроизоляционной конструкции. Чем больше этот угол, тем больше диэлектрические потери, расходуемые на нагрев диэлектрика. Обычно в качестве параметра материала или конструкции приводят тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c}. \quad (1.25)$$

Если бы в диэлектрике активная мощность совсем не рассеивалась («идеальный» диэлектрик), то активный ток  $I_a$  был бы равен нулю, а вектор тока  $I$  опережал бы вектор напряжения  $U$  точно на  $90^\circ$ . При этом ток через диэлектрик был бы чисто емкостным и  $\operatorname{tg} \delta$ , определяемый по (1.25), был бы равен нулю ( $I_a = 0$ ). Поэтому схема замещения «идеального» диэлектрика представляет собой емкость.

Значения  $\operatorname{tg} \delta$  у газообразных диэлектриков достаточно малы ( $10^{-6}$ – $10^{-5}$ ), поэтому газообразные диэлектрики (воздух, азот и др.) используются в образцовых конденсаторах.

У жидких и твердых диэлектриков высокого класса  $\operatorname{tg} \delta = (2-6) \cdot 10^{-4}$ , у остальных  $\operatorname{tg} \delta = 0,002-0,05$ .

Получим выражение для мощности диэлектрических потерь реального диэлектрика. Активная мощность, выделяемая в электрической цепи, определяется формулой

$$P_a = U \cdot I_a. \quad (1.26)$$

Подставляя значение активного тока из (1.25), мы получим

$$P_a = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (1.27)$$

Емкостный ток в цепи переменного напряжения

$$I_c = U \cdot \omega C. \quad (1.28)$$

Подставив (1.28) в формулу (1.27), получим окончательно

$$P_a = U^2 \cdot \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (1.29)$$

Из формулы (1.29) видно, что диэлектрические потери прямо пропорциональны  $tg\delta$ , они также зависят от частоты и амплитуды приложенного напряжения и емкости образца диэлектрика.

Диэлектрические потери неудобно выражать в абсолютном виде, так как они зависят от объема диэлектрика (с ним связано значение емкости  $C$ ). Поэтому преимущество отдается показателю, который зависит только от качества материала и при этом относительно легко определяется. Таким показателем является тангенс угла диэлектрических потерь.

### 1.4.3 Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от различных факторов

Значения  $tg\delta$ , как и другие параметры диэлектриков для данных образцов материалов или участков изоляции, не являются строго постоянными, а зависят от различных внешних факторов.

Эти зависимости имеют существенное практическое значение.

*Температурная зависимость  $tg\delta$ .* При рассмотрении температурной зависимости  $tg\delta$  необходимо различать полярные и неполярные диэлектрики.

У неполярного диэлектрика проявляются только потери на электропроводность. Поэтому с ростом температуры  $tg\delta$ , следовательно, и диэлектрические потери растут (рис. 1.23, *a*), что обусловлено возрастанием тока проводимости в диэлектрике.

У полярных диэлектриков к потерям на электропроводность, которые больше, чем у неполярных диэлектриков, добавляются потери на поляризацию дипольных молекул.

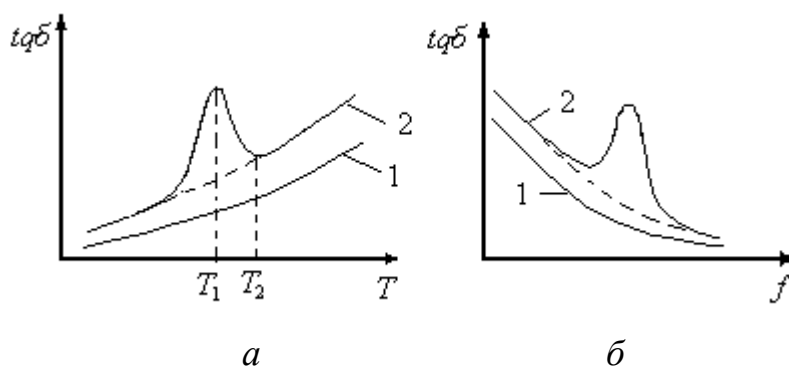


Рис. 1.23. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь: *a* – от температуры; *б* – от частоты: 1 – неполярный диэлектрик; 2 – полярный диэлектрик



При низких температурах вязкость материалов высока, диполи практически не разворачиваются при приложении поля, и дипольная поляризация отсутствует, а  $tg\delta$  имеет низкие значения (см. рис. 1.23, а). С ростом температур до значения  $T_1$  происходит уменьшение вязкости и усиление дипольной поляризации, вследствие чего возрастает и  $tg\delta$ . С дальнейшим ростом температуры (участок  $T_1 - T_2$ ) вязкость становится настолько мала, что диполи легко поворачиваются по полю и уменьшаются затраты энергии на трение. В результате чего  $tg\delta$  уменьшается. Рост  $tg\delta$ , а следовательно, активных потерь в диэлектрике, начиная с температуры  $T_2$  и выше, вызван увеличением тока проводимости, так как вязкость вещества уменьшается и носители тока (свободные ионы и электроны) приобретают большую скорость.

*Частотная зависимость  $tg\delta$ .* В неполярных диэлектриках существуют только потери на электропроводность, которые не зависят от частоты переменного электрического поля. Вследствие этого произведение  $\omega tg\delta$  в выражении (1.29) должно иметь постоянное значение. Поэтому тангенс угла потерь  $tg\delta$  с ростом частоты уменьшается по гиперболе (см. график 1, рис. 1.23, б).

В полярных диэлектриках рассеиваемая мощность в основном определяется потерями на трение при ориентации дипольных молекул. Поэтому диэлектрические потери возрастают с частотой до тех пор, пока поляризация успевает следовать за изменением поля, при этом растет и  $tg\delta$  (см. график 2, рис. 1.23, б). Когда же частота становится настолько велика, что дипольные молекулы уже не успевают полностью ориентироваться в направлении поля, и  $tg\delta$  падает, то потери  $P_a$  становятся постоянными в соответствии с формулой (1.29).

Таким образом, зависимость диэлектрических потерь  $P_a$  от частоты (рис. 1.24) не соответствует частотной зависимости  $tg\delta$ .

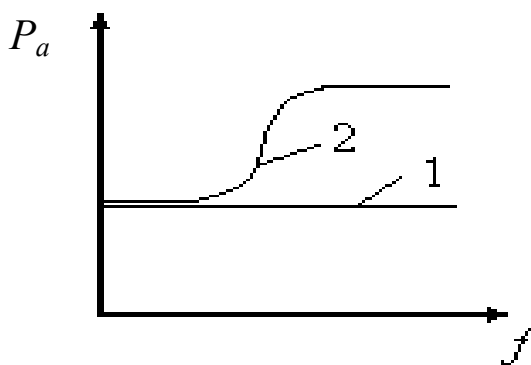


Рис. 1.24. Зависимость диэлектрических потерь от частоты:  
1 – неполярный диэлектрик; 2 – полярный диэлектрик

*Зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от напряжения.* При оценке качества изоляции большое практическое значение имеет зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  электрической изоляции от приложенного к ней напряжения.

Обычно  $\operatorname{tg} \delta$  от напряжения практически не зависит, так что диэлектрические потери при повышении напряжения возрастают пропорционально  $U^2$ . Однако иногда зависимость  $\operatorname{tg} \delta (U)$  имеет весьма характерный вид, представленный на рисунке 1.25.

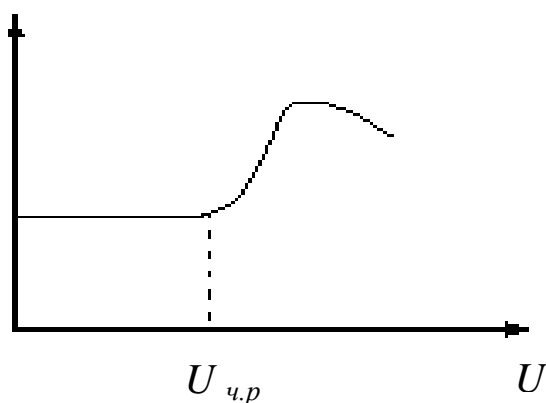


Рис. 1.25. Зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от приложенного к изоляции напряжения:  
 $U_{\text{ч.р}}$  — напряжение начала частичных разрядов

Из графика видно, что при значениях напряжения, превышающих  $U_{\text{ч.р}}$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  резко возрастает. Это связано с началом ионизации включений воздуха или других газов в изоляции. Ионизация в газовых включениях (мельчайших зазорах, прослойках и пузырьках газов) приводит к так называемым частичным разрядам в них. Частичные разряды локализуются в ограниченной части объема изоляции, т. е. не доходят до обоих электродов.

Возникновение разрядов в газовых включениях объясняется как малой диэлектрической проницаемостью газов (соответственно большой напряженностью во включениях), так и малой электрической прочностью газов. Рассеяние энергии частичными разрядами приводит к росту  $\operatorname{tg} \delta$  при увеличении напряжения выше значения  $U_{\text{ч.р}}$ . Частичные заряды в небольшом количестве не могут вызвать необратимых изменений в твердой изоляции. Если через небольшое время снизить напряжение на изоляции ниже напряжения начала частичных разрядов  $U_{\text{ч.р}}$ , то частичные разряды гаснут и  $\operatorname{tg} \delta$  снижается до исходного значения. Однако образование частичных разрядов в высоковольтной изоляции, предназначенной для длительной эксплуатации, весьма

нежелательно. Частичные разряды вызывают дополнительный нагрев изоляции, ее эрозию и в результате приводят к ускоренному старению изоляции.

Сказанное определяет важность получения характеристики  $tg\delta(U)$  для высоковольтной изоляции.

Как правило, рабочее напряжение изоляции должно быть ниже напряжения начала частичных разрядов  $U_{ч.р.}$ . Следует считать более высококачественной такую изоляцию, у которой  $U_{ч.р.}$  более высокое, а подъем кривой  $tg\delta(U)$  более пологий.

#### 1.4.4 Измерение тангенса угла диэлектрических потерь

Определение  $tg\delta$  при частоте 50 Гц производится обычно с помощью моста высокого напряжения (моста Шеринга). Мост питается через повышающий трансформатор  $T$  (рис. 1.26) высоким напряжением 1–10 кВ. В высоковольтные плечи моста включены испытуемый диэлектрик  $C_x$  и эталонный высоковольтный конденсатор  $C_0$ .

В два других плеча включаются переменное сопротивление  $R_3$  и постоянное сопротивление  $R_4$ , шунтированное переменной емкостью  $C_4$ .

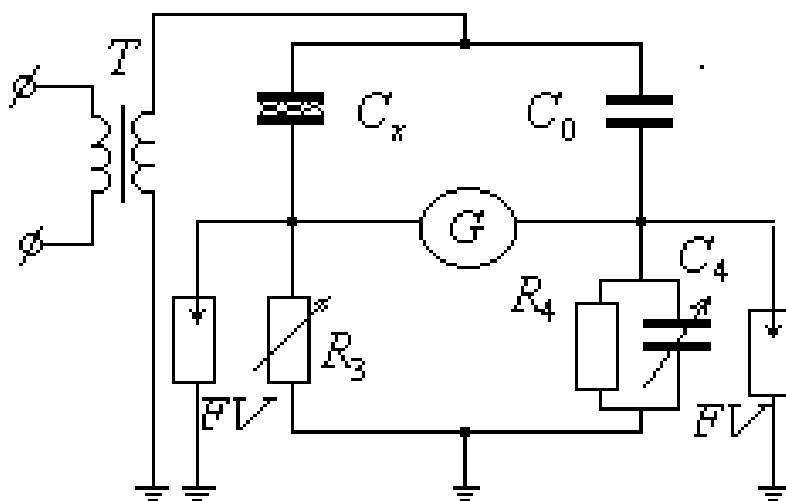


Рис. 1.26. Принципиальная схема высоковольтного моста для измерения  $tg\delta$

Равновесие моста достигается регулировкой сопротивления  $R_3$  и емкости  $C_4$ . Если ток, протекающий через гальванометр  $G$ , равен нулю, то такой мост называют уравновешенным. Для уравновешенного моста произведения полных сопротивлений противоположных плеч равны между собой

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_0 \cdot Z_3. \quad (1.30)$$

Это равенство называют условием равновесия моста. Из него легко можно определить параметры испытуемого образца, включенного в плечо  $x$ , по параметрам остальных плеч. Например, емкость образца определится выражением

$$C_x = C_o \frac{R_4}{R_3}, \quad (1.31)$$

а тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4. \quad (1.32)$$

Для защиты низковольтной части моста в случае пробоя образца в схеме предусмотрены разрядники  $FV$ .

### Контрольные вопросы

1. Почему диэлектрические потери определяют на переменном напряжении?
2. Каким показателем характеризуют диэлектрические потери?
3. Чем опасны повышенные диэлектрические потери в материалах?
4. Каким показателем характеризуют диэлектрические потери?
5. Объясните построение векторной диаграммы для эквивалентной схемы замещения диэлектрика.
6. Как изменится эквивалентная схема замещения диэлектрика при отсутствии в нем диэлектрических потерь?
7. Объясните температурную зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  для полярного диэлектрика.
8. Почему в некоторых материалах  $\operatorname{tg} \delta$  начинает расти при достижении приложенным напряжением определенного значения?
9. Как с помощью высоковольтного моста можно определить  $\operatorname{tg} \delta$ ?

## 1.5 Пробой диэлектриков

### 1.5.1 Основные понятия

Пробоем называют резкую потерю электроизоляционной способности диэлектрика под действием внешнего электрического поля. Потеря электроизоляционной способности может быть обратимой, как это бывает в газообразных и жидких диэлектриках, или необратимой в случае твердых материалов.

С физической точки зрения пробой представляет собой всегда неконтролируемое повышение электрической проводимости изоляции, которое могут вызывать процессы различного характера, например, ударная ионизация, чрезмерный нагрев, старение.

Пробой изоляции является одним из серьезнейших повреждений электрического оборудования и часто приводит к невозможности его дальнейшей эксплуатации.

Наибольшее значение напряжения, которое было приложено к диэлектрику в момент пробоя, называется пробивным напряжением и обозначается  $U_{np}$ . Пробивное напряжение электрической изоляции зависит от ее толщины, т. е. от расстояния между электродами  $h$  (рис. 1.27). Чем толще слой электроизоляционного материала, тем выше пробивное напряжение этого слоя. Слои одной и той же толщины различных материалов имеют различные значения пробивного напряжения, что дает основание для введения еще одного показателя свойств диэлектрических материалов *электрической прочности*.

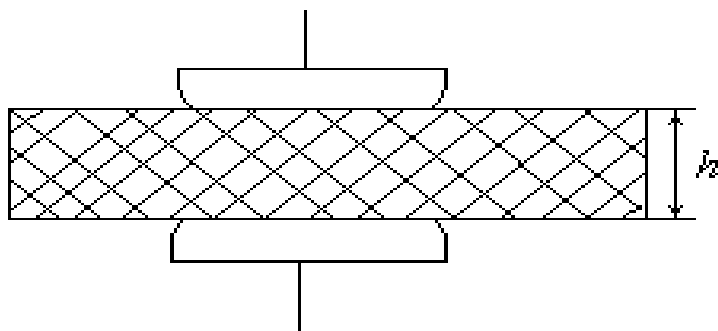


Рис. 1.27. Расположение диэлектрика между электродами при определении электрической прочности

Под электрической прочностью понимают способность электроизоляционных материалов противостоять пробую. Электрическую прочность характеризуют величиной минимальной напряженности однородного электрического поля, приводящей к пробую диэлектрика. Часто под электрической прочностью понимают само значение пробивной напряженности, полученное по формуле (1.33)

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}. \quad (1.33)$$

Обычно в качестве единиц измерения используют кВ/см, кВ/мм.

Для надежной работы любого электрического устройства рабочее напряжение его изоляции  $U_{раб}$  должно быть существенно меньше пробивного напряжения  $U_{пр}$ . Отношение  $U_{пр}/U_{раб}$  называют *коэффициентом запаса электрической прочности*.

## 1.5.2 Пробой газов

В нормальном неионизированном состоянии газы являются почти идеальными диэлектриками. Они обладают высоким удельным сопротивлением и очень малым углом диэлектрических потерь. Газы способны самовосстанавливать свои свойства после пробоя и у них отсутствует старение, т. е. ухудшение свойств с течением времени.

Основным недостатком газов как изоляционных материалов является их низкая электрическая прочность. Она в десятки раз ниже электрической прочности твердых диэлектриков.

Нормальное состояние в газе нарушается при напряженности поля, вызывающей в нем интенсивную ионизацию. Чтобы описать пробой газа, необходимо понять условия возникновения, движения и исчезновения заряженных частиц в электрическом поле.

### 1.5.2.1 Процессы ионизации в газах

В газах атомы обычно связаны в молекулы. При отрыве одного электрона от нейтральной молекулы возникают независимые друг от друга положительный ион и свободный электрон. Процесс отрыва электрона от молекулы или атома называется *ионизацией*. Для ионизации молекулы требуется затратить энергию, называемую *энергией ионизации*. Энергию ионизации ( $W_u$ ) принято измерять в электрон-вольтах (эВ). Один эВ равен кинетической энергии, которую приобретает электрон при свободном движении между двумя точками с разностью потенциалов в 1 В. Энергия ионизации является постоянной величиной и для большинства различных газов изменяется в пределах 4–25 эВ. Наибольшие значения  $W_u$  имеют инертные газы, наименьшие – щелочные газы.

Условие, определяющее возможность ионизации

$$W \geq W_u, \quad (1.34)$$

где  $W$  – энергия, воздействующая на атом или молекулу.

Процесс захвата свободного электрона положительным ионом, т. е. процесс, обратный ионизации, называется *рекомбинацией*. При рекомбинации возникает нейтральная молекула и высвобождается энергия в виде излучения фотона.

Пробой газа является следствием развития процессов ударной ионизации и фотоионизации.

*Ударная ионизация* представляет собой расщепление молекулы при столкновении с ней электрона, ускоренного электрическим полем (рис. 1.28, а). Кинетическая энергия электрона, разгоняемого электрическим полем, может быть выражена уравнением

$$W_e = E \cdot q \cdot \lambda, \quad (1.35)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;  
 $q$  – заряд электрона;  
 $\lambda$  – путь, пройденный электроном от предыдущего столкновения.

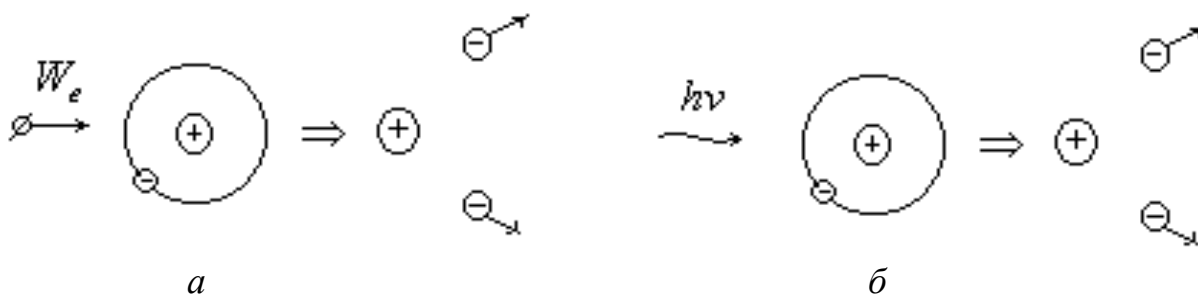


Рис. 1.28. Схема ионизации молекулы: а – ударной; б – фотоионизации

Тогда условие ударной ионизации можно представить в виде

$$W_e \geq W_u. \quad (1.36)$$

*Фотоионизация* представляет собой расщепление молекулы под действием поглощенной энергии фотона, т. е. энергии излучения (рис. 1.28, б).

Условие фотоионизации имеет вид

$$h\nu \geq W_u, \quad (1.37)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  – частота излучения.

При пробое газов источником излучения фотонов может служить рекомбинация, а также переход молекул из возбужденного состояния в нормальное.

### 1.5.2.2 Механизм пробоя газов

Рассмотрим *механизм пробоя* газообразных диэлектриков. Даже при нормальных условиях в газах всегда содержится некоторое количество свободных заряженных частиц (электронов и ионов). Они постоянно возникают за счет фотоионизации молекул под действием солнечного, космического и радиоактивного излучений.

Предположим, что в какой-либо точке поля возник такой свободный электрон. Если напряженность поля между электродами достаточно велика, то свободный электрон, разгоняясь, приобретает кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации. При столкновении с молекулой он выбивает из нее положительный ион и еще один свободный электрон. Разгоняясь в электрическом поле, каждый из этих электронов в свою очередь ионизирует по молекуле, что приводит к образованию уже четырех свободных электронов (рис. 1.29, а) и т. д.

Процесс образования свободных электронов идет лавинообразно. Этот быстро нарастающий поток электронов называют *лавиной* электронов. Для того чтобы произошел пробой газового промежутка, недостаточно возникновения одной лавины. Заряды разных знаков в лавине разделены (рис. 1.29, б) и она одна не может сформировать плазменный канал, состоящий из смеси электронов и положительных ионов.

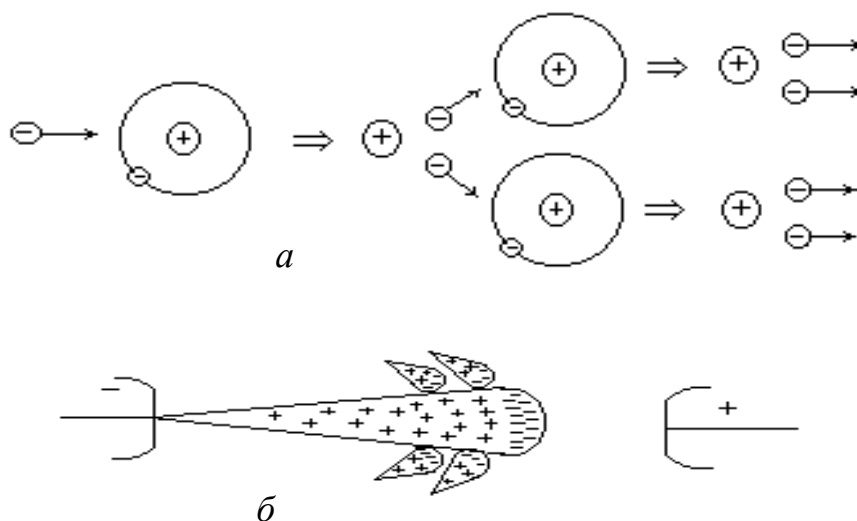


Рис. 1.29. Схема образования лавины электронов: распределение зарядов в начальной (а) и вторичной (б) лавинах



Для возникновения плазменного канала необходимо появление новых *вторичных* лавин. Причиной их возникновения чаще всего бывает усиление поля перед первой лавиной, а также фотоионизация, вызванная излучением у головы этой лавины. После прохождения первой лавины электронов за ней остается положительный пространственный заряд, в который втягиваются электроны вторичных лавин (см. рис. 1.29, б). Это смешивание разноименных зарядов и приводит к образованию плазменного канала (искры) между электродами.

### 1.5.2.3 Влияние формы электрического поля и полярности электродов на разрядное напряжение

Явление пробоя газа зависит от степени однородности электрического поля, в котором осуществляется пробой. Электрические поля принято делить на однородные и неоднородные.

*Однородным* электрическим полем называется поле, в различных точках которого напряженность имеет одинаковые значения. Например, однородным является поле в средней части плоского конденсатора (рис. 1.30, а).

В таком поле пробой наступает практически мгновенно при достижении строго определенного напряжения, зависящего от температуры и давления газа. Однородным полям соответствует самая большая электрическая прочность газов.

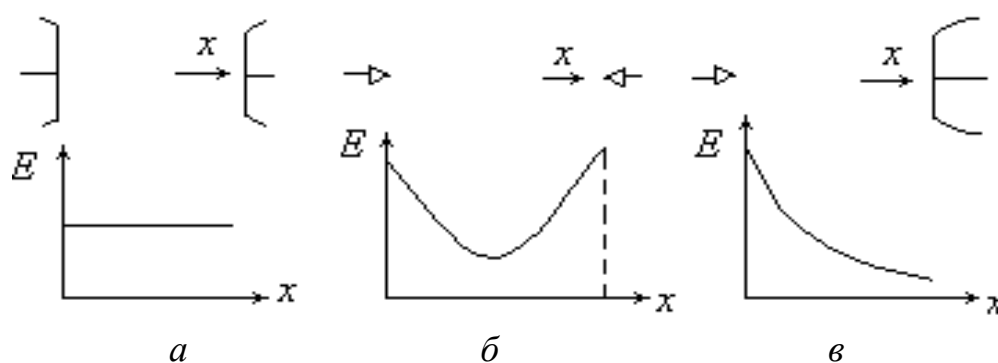


Рис. 1.30. Распределение напряженности поля в средней части воздушных промежутков с электродами различной формы

В *неоднородном* поле напряженность в различных точках имеет неодинаковые значения. В электрических установках большинство полей является *резко неоднородными*. В таких полях напряженность между электродами в различных точках отличается более чем в три

раза. Примером резко неоднородных полей могут служить поля между электродами: *острие – острие* и *острие – плоскость* (рис. 1.30, б, в), являющиеся аналогами реальных систем электродов *провод – провод* и *провод – земля* на воздушных линиях электропередачи.

В неоднородных полях электрическая прочность газов всегда ниже, чем в однородных. Это объясняется тем, что в неоднородных полях имеются места с повышенной напряженностью, где и начинается ударная ионизация при сравнительно небольших напряжениях на электродах. Чем меньше размеры электрода, тем больше около него напряженность электрического поля (рис. 1.30, в).

При несимметричных электродах и постоянном напряжении пробивное напряжение зависит и от полярности электродов. Поскольку вблизи острия напряженность поля наибольшая, там начинается процесс ударной ионизации, в результате которого образуются заряженные частицы – электроны и ионы. Электроны являются более подвижными частицами, поэтому быстро уходят из зоны ионизации и отдают свой заряд положительному аноду. В результате в зоне ионизации, которая ограничена небольшой областью у острия, образуется избыток положительных ионов (положительный объемный заряд). В случае положительного острия положительный объемный заряд является как бы продолжением острия и увеличивает напряженность на участке  $x$  (рис. 1.31, а), что способствует развитию ионизации на этом участке. При отрицательном острие положительный объемный заряд экранирует острие и тем самым уменьшает напряженность на участке  $x$  (рис. 1.31, б), что затрудняет процессы ионизации справа от объемного заряда.

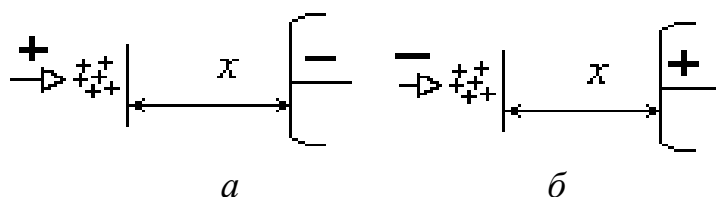


Рис. 1.31. Пояснение к отличию пробивных напряжений:  
 а – при положительной поляризации острия;  
 б – при отрицательной поляризации острия

Итак, положительный объемный заряд способствует развитию разряда при положительном острие и затрудняет его при отрицательном. В результате разрядное напряжение при отрицательном острие

примерно в два раза выше, чем при положительном. Это отличие разрядных напряжений получило название эффекта полярности.

#### 1.5.2.4 Закон Пашена

Пробивное напряжение газа в однородном поле зависит от давления газа ( $\rho$ ) и расстояния ( $S$ ) между электродами

$$U_{np} = f(\rho \cdot S). \quad (1.38)$$

Эта зависимость, типичный характер которой показан на рисунке 1.32, получила название закона Пашена. Кривая Пашена имеет характерный минимум  $U_{np.min}$  при критическом значении  $(\rho \cdot S)_{min}$ .

При низких давлениях, соответствующих вакууму ( $\rho \rightarrow 0$ ), газы обладают достаточно высоким пробивным напряжением. Это объясняется малым количеством столкновений электронов, разгоняемых электрическим полем, с молекулами газа и, соответственно, малой вероятностью ионизации.

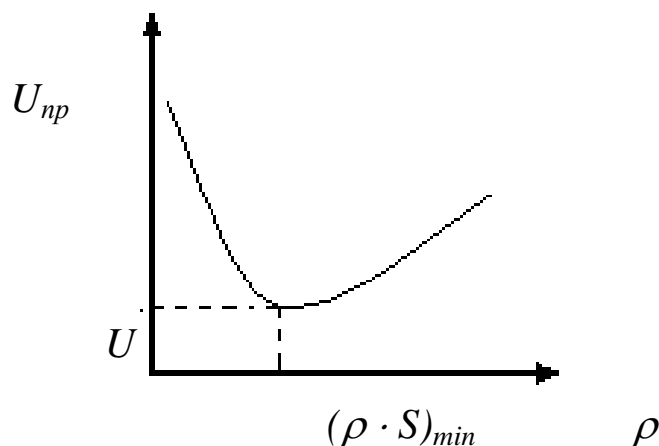


Рис. 1.32. Кривая Пашена

С увеличением давления возрастает число молекул газа в единице объема, увеличивается число столкновений электронов с молекулами, а в результате возрастает вероятность ударной ионизации. Это приводит к снижению  $U_{np}$  вплоть до значения  $U_{np.min}$ .

При дальнейшем увеличении давления число молекул в единице объема становится настолько большим, что существенно сокращается длина пути свободного пробега электронов. Электроны, постоянно сталкиваясь с молекулами, не могут разогнаться электрическим по-

лем и приобрести кинетическую энергию, необходимую для ударной ионизации. В результате вероятность ионизации уменьшается и  $U_{np}$  возрастает.

Эффект увеличения электрической прочности при низких и высоких давлениях используется на практике при создании вакуумной изоляции и изоляции, работающей под давлением.

### 1.5.3 Пробой жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики обладают более высокой электрической прочностью, чем газы. Это объясняется большей плотностью жидких диэлектриков и соответственно меньшими значениями длины пути свободного пробега электронов. Поэтому для ускорения электронов до скоростей, соответствующих ударной ионизации, требуется создание в жидком материале большей напряженности электрического поля, чем в газообразном.

Электрическая прочность жидких диэлектриков очень сильно зависит от количества содержащихся в них примесей. Например, для минерального масла  $E_{np}$  находится в пределах от 30 до 500 кВ/см, в зависимости от содержания загрязнения (прежде всего влаги). Электрическая прочность у хорошо очищенных жидких диэлектриков может достигать 1 000 кВ/см.

В жидких диэлектриках различают два вида пробоя: тепловой и электрический.

*Тепловой пробой* характерен для жидкостей, содержащих различные примеси и загрязнения.

Чаще всего в жидких диэлектриках в качестве примесей встречается вода. Под влиянием электрического поля капли влаги поляризуются и превращаются в диполи. Противоположные по знаку заряды, находящиеся в этих диполях, взаимодействуют с приложенным полем и растягивают капли, превращая их в удлиненные эллипсоиды (рис. 1.33, а). Разноименно заряженные концы эллипсоидов, притягиваясь друг к другу, образуют между электродами так называемые мостики из примесей (рис. 1.33, б). Поскольку вода обладает повышенной проводимостью, по мостикам проходит ток, разогревающий воду до температуры кипения. В результате вскипания воды между электродами образуется газовый канал, в котором начинается ударная ионизация электронами и происходит пробой, аналогичный пробоем в газовых промежутках.

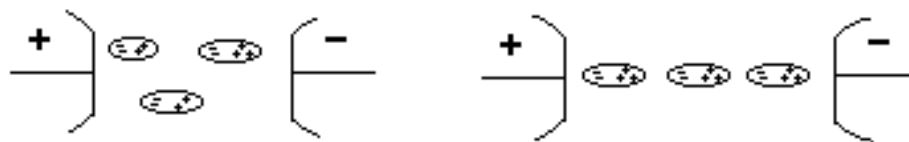


Рис. 1.33. Схема образования мостиков из примесей

Если же в жидком диэлектрике находится не вода, а другие примеси, то газовый канал может появиться в результате испарения самого жидкого диэлектрика. Поскольку диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика отличается от диэлектрической проницаемости примесей, а напряженность электрического поля распределяется обратно пропорционально  $\epsilon_r$ , на границах жидкости и примесей будут возникать местные повышения напряженности электрического поля (рис. 1.34). Вследствие этого начинается ударная ионизация и местный разогрев жидкого диэлектрика на границах с примесями. Разогрев вызывает испарение жидкости и образование газовых каналов, по которым и происходит пробой.

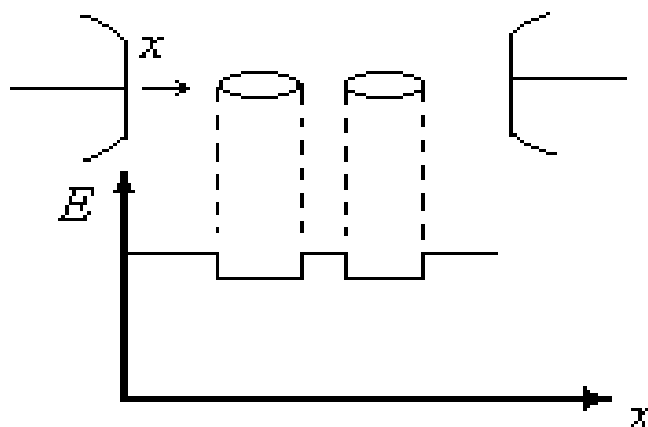


Рис. 1.34. Распределение напряженности поля в жидком диэлектрике с примесями

Механизм пробоя, которому предшествует разогрев примесей или самого жидкого диэлектрика рядом с примесями, с образованием газовых каналов, относится к тепловому пробояю.

*Электрический пробой* характерен для хорошо очищенных жидких диэлектриков. В этих случаях, как правило, уже не могут образоваться сплошные мостики из загрязнений и пробой происходит за счет ударной ионизации электронами.

Начальная стадия развития разряда в хорошо очищенной жидкости возникает при значениях напряженности  $500 \text{ кВ/см}$  и более. При такой напряженности электрического поля начинается эмиссия электронов с катода, а также автоионизация у анода. Автоионизация представляет собой процесс вырывания электронов у молекул диэлектрика под действием сил приложенного поля.

Появившиеся в жидком диэлектрике свободные электроны разгоняются электрическим полем. При столкновениях с молекулами жидкого диэлектрика они могут вызывать их разложение с выделением газов. В результате около электродов образуются небольшие нитеобразные газовые каналы, которые за счет ударной ионизации быстро заполняются плазмой (рис. 1.35). При одинаковой форме электродов появление плазмы происходит у анода гораздо быстрее, чем у катода. Это объясняется быстрым увеличением проводимости диэлектрика у анода за счет происходящей автоионизации. Таким образом, при одинаковой форме электродов плазменный канал развивается от анода к катоду. В противном случае разряд начинается от электрода, имеющего меньшие размеры и, соответственно, большую напряженность поля. Если таким электродом является катод, то плазменный канал появляется за счет ударной ионизации электронами, испускаемыми катодом.

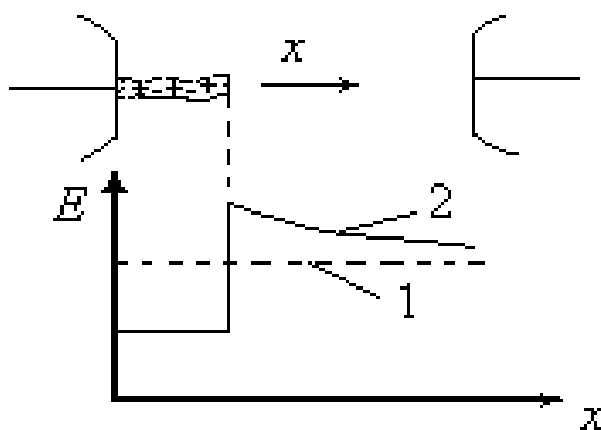


Рис. 1.35. Плазменный канал и распределение напряженности поля:  
1 – до его появления; 2 – после появления

Напряженность у головы плазменного канала имеет высокое значение (рис. 1.35), так как канал обладает достаточной проводимостью и является как бы продолжением электрода. Поэтому перед плазменным каналом происходит интенсивная ионизация. Электроны, уходящие по каналу на анод, разогревают плазменный канал до

температуры в несколько тысяч градусов. При этом в канале происходит термическая ионизация, и он заполняется плазмой с еще большей плотностью заряженных частиц. Проводимость канала и напряженность перед ним снова возрастают. Ионизация перед плазменным каналом усиливается, и он начинает быстро продвигаться к противоположному электроду, пока не замкнет электроды между собой.

#### 1.5.4 Пробой твердых диэлектриков

Твердые диэлектрики обладают более высокой электрической прочностью, чем жидкие и газообразные, так как они имеют высокую плотность и требуется большая напряженность поля для возникновения в них ударной ионизации. Пробивная напряженность большинства твердых диэлектриков при кратковременном воздействии напряжения в однородном поле составляет 1 000–10 000 кВ/см.

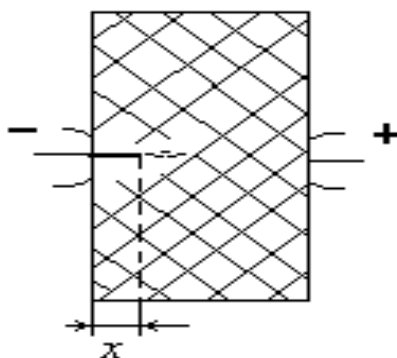
Исследования процессов пробоя твердых диэлектриков показывают, что пробивная напряженность и сам механизм пробоя определяются в основном структурой материала, видом и длительностью воздействующего напряжения.

По физической сути развития пробоя можно выделить четыре основных вида.

*Электрический пробой* представляет собой разрушение структуры диэлектрика непосредственно силами электрического поля. Это разрушение вызвано процессами ударной ионизации электронами, разгоняемыми приложенным электрическим полем.

Свободные электроны, появляющиеся в основном за счет эмиссии с катода, под действием высокой напряженности электрического поля устремляются в глубь твердого диэлектрика. Однако из-за высокой плотности твердых материалов глубина их проникновения  $x$  мала и в среднем составляет 0,05 см. Благодаря высокой энергии электронов соударения их с молекулами вещества приводят к разрушению химических связей. В результате на небольшом участке происходит переход твердого диэлектрика в состояние частично ионизированной газовой плазмы. Появляется небольшой канал разрушения. Этот канал переносит высокую напряженность поля в глубь материала, поэтому эмиссия электронов происходит уже на новом участке диэлектрика (см. рис. 1.36). Далее следует очередной частичный пробой и разрушение быстро прорастает к противоположному электроду. Этот вид пробоя развивается во времени практически мгновенно.

Электрическая прочность при чисто электрическом пробое называется кратковременной. Она определяет способность диэлектрика выдерживать кратковременные повышения напряжения (перенапряжения), возникающие в процессе его эксплуатации в качестве электрической изоляции.



*Рис. 1.36. Первый плазменный канал, эмитирующий электроны в диэлектрик*

У однородных диэлектриков, имеющих одинаковые физические свойства во всех точках объема, электрическая прочность практически не зависит от толщины пробиваемых образцов (см. рис. 1.37, зависимость 1).

Большинство диэлектриков, применяемых на практике, отличается неоднородностью своей структуры. Попадание в однородный диэлектрик включений, обладающих повышенной проводимостью или малой диэлектрической проницаемостью, значительно снижает электрическую прочность. Это объясняется искажением электрического поля. Максимальная напряженность на поверхности включений может во много раз превосходить среднюю напряженность электрического поля в диэлектрике.

В этом случае к рассмотренному ранее механизму пробоя добавляются интенсивные процессы ударной ионизации в местах расположения неоднородностей. Поэтому у неоднородных диэлектриков, как правило, наблюдается уменьшение электрической прочности с увеличением их толщины (см. рис. 1.37, зависимость 2).

*Тепловой пробой* является следствием разогрева диэлектрика диэлектрическими потерями при приложении электрического поля. Этот вид пробоя развивается следующим образом: когда к диэлектрику прикладывается напряжение, в нем выделяется теплота потерь и температура его повышается, вследствие чего потери еще более



увеличиваются. Если количество выделяемой теплоты превысит количество теплоты, которое диэлектрик способен передать в окружающую среду, то процесс разогрева будет усиливаться.

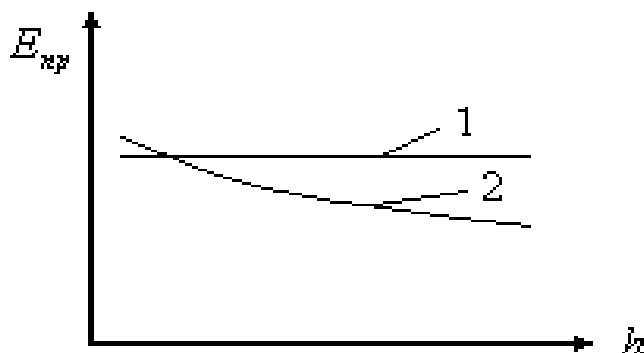


Рис. 1.37. Зависимости пробивной напряженности от толщины диэлектрика: 1 – однородный диэлектрик; 2 – неоднородный

В результате происходит расплавление или обугливание материала и его собственная электрическая прочность снижается настолько, что происходит пробой. При этом для возникновения пробоя достаточно, чтобы разогрелось какое-нибудь место диэлектрика, в котором теплоотдача хуже или удельные потери повышены.

Активная мощность, которую диэлектрик способен отвести за единицу времени через поверхность в окружающую среду, выражается формулой

$$P = G \cdot S \cdot (t - t_o), \quad (1.39)$$

где  $G$  – коэффициент теплопередачи;

$S$  – площадь поверхности диэлектрика;

$t$  – температура диэлектрика.

$t_o$  – температура окружающей среды;

Приравняв мощность, отводимую от диэлектрика (1.39), к мощности, выделяемой в диэлектрике за счет диэлектрических потерь (1.29), можно получить условие теплового равновесия

$$U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = G \cdot S \cdot (t - t_o). \quad (1.40)$$

Из условия равновесия можно определить напряжение теплового пробоя

$$U_{np} = \sqrt{\frac{G \cdot S \cdot (t - t_o)}{\omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}}. \quad (1.41)$$

Как видно из (1.41), электрическая прочность в случае теплового пробоя зависит не только от свойств диэлектрика (относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь, коэффициента теплопередачи), но и от температуры, частоты воздействующего напряжения, а также от условий охлаждения.

Для возникновения теплового пробоя необходимо определенное время, пока температура повысится до опасного уровня, поэтому время от приложения электрического поля до теплового пробоя существенно больше, чем при чисто электрическом пробое. Иногда оно имеет порядок нескольких минут и даже часов.

*Электрохимический пробой* связан с необратимыми химическими изменениями диэлектрика в электрическом поле. Так, под действием приложенного высокого напряжения в диэлектриках могут возникать электролитические явления, вызывающие химическое разложение вещества и перенос внутри диэлектрика продуктов этого разложения. Процесс электролиза приводит к медленному прорастанию химических разрушений материала, свойства диэлектрика постоянно ухудшаются, ток проводимости растет, пока не наступает пробой диэлектрика. Этот процесс называется электрохимическим старением электроизоляционных материалов. Электролиз возникает в материалах с повышенной ионной проводимостью. К таким материалам относятся стекло, бумажно-масляная изоляция. Электрохимическое старение резко ускоряется при увлажнении изоляции и загрязнении ее веществами ионного характера. Способствует старению изоляции и действие высоких температур.

*Ионизационный пробой* вызван ионизацией и частичными разрядами, возникающими в газовых включениях изоляции. Эти процессы оказывают на окружающий газовое включение диэлектрик электрическое, механическое и химическое воздействие.

В результате возникает микроскопическая эрозия материала, расширяющая объем газового включения. Постепенно из газового включения начинают прорастать каналы, по мере удлинения которых рассеиваемая энергия возрастает, способствуя еще большей скорости эрозии материала. Под действием высокой температуры в каналах часто образуются смолистые вещества, каналы обуглероживаются и становятся проводящими. Повышенная напряженность электрического поля на концах этих каналов ведет к образованию новых пузырьков газа и дальнейшему развитию разряда. По форме такой разряд

похож на ствол дерева с ветвями, поэтому он носит название ветвистого, или дендритного, разряда.

По времени ионизационный пробой развивается довольно медленно, до тех пор, пока не будет перекрыт весь промежуток между электродами.

### **Контрольные вопросы**

1. Каким параметром характеризуют электрическую прочность диэлектриков?
2. Какими процессами обусловлен пробой газов?
3. Почему в неоднородных электрических полях электрическая прочность воздуха ниже, чем в однородных?
4. Чем объяснить влияние полярности несимметричных электродов на разрядное напряжение?
5. Почему в вакууме и при повышенных давлениях пробивное напряжение газов имеет наибольшие значения?
6. Какие существуют виды пробоя жидких диэлектриков, чем они отличаются?
7. Какие существуют виды пробоя твердых диэлектриков, какими процессами они вызваны?
8. Почему с увеличением толщины твердого диэлектрика его электрическая прочность уменьшается?

## **1.6 Основные физические свойства диэлектриков**

### **1.6.1 Влажностные свойства**

Под воздействием влажности электрические свойства большинства диэлектриков, служащих в качестве электроизоляционных материалов, ухудшаются. Чрезвычайно сильное влияние воды на свойства электроизоляционных материалов связано с ее высокой относительной диэлектрической проницаемостью и большой степенью диссоциации на ионы, которая вызывает высокую электропроводность воды. Удельное объемное сопротивление воды составляет всего  $\rho = 10^3 - 10^4$  Ом·м. В воде легко диссоциируют и молекулы других веществ, что еще больше повышает электропроводность материалов, содержащих влагу.

В результате увлажнения увеличиваются удельная электрическая проводимость и диэлектрические потери диэлектриков, а также

уменьшается их электрическая прочность. Поэтому в электроизоляционной технике уделяется большое внимание устранению воды из электроизоляционных материалов и защите их от увлажнения в процессе эксплуатации.

Главным источником влаги является обычная атмосфера, в которой находится электроизоляционный материал. Иногда электроизоляционные материалы находятся в прямом контакте с водой.

При соприкосновении твердого диэлектрика с атмосферой, содержащей влагу, происходят два явления – *адсорбция*, т. е. поглощение влаги поверхностью диэлектрика, и *абсорбция*, т. е. поглощение влаги внутрь материала. Способность материала впитывать влагу из окружающей среды называется *гигроскопичностью*. На гигроскопичность материала существенное влияние оказывает его строение. Большую роль играют наличие и размер капиллярных промежутков внутри материала, в которые проникает влага. Сильно пористые материалы, в частности волокнистые, более гигроскопичны, чем материалы плотного сплошного строения. Гигроскопичность материалов, практически лишенных пор (например, стекол), может быть только поверхностной: поглощаемая из окружающей среды влага накапливается в виде тонкой пленки на поверхности материала, но не проникает вглубь.

При увлажнении диэлектрики увеличивают свою массу. На этом основывается применение на практике условного показателя – *влажнопоглощаемости*, которая определяется как относительное приращение массы при выдержке в воздухе с 100 %-й относительной влажностью

$$w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \%, \quad (1.42)$$

где  $m_1$  – масса испытываемого образца в высушенном состоянии;

$m_2$  – масса образца после выдержки в увлажняющих условиях в течение 24, 48 или 72 часов.

Аналогично определяется условный показатель, называемый *водопоглощаемостью*, который характеризует приращение массы диэлектрика при погружении его в воду.

Кроме гигроскопичности большое практическое значение имеет *влажнопроницаемость*, т. е. способность материалов пропускать сквозь себя пары воды. Эта характеристика чрезвычайно важна для оценки

качества материалов, применяемых для защитных покровов (оболочки кабелей, лаковые покрытия изоляции электрических машин и т. п.).

Если влага проникает через слой диэлектрика толщиной  $h$ , с одной стороны которого давление водяного пара равно  $\rho_1$ , на другую сторону, где давление водяного пара  $\rho_2$ , то за время  $t$  через поверхность площадью  $S$  пройдет количество влаги

$$M = \Pi \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot S}{h} \cdot t, \quad (1.43)$$

где коэффициент  $\Pi$  и есть влагопроницаемость в секундах.

Для различных материалов влагопроницаемость изменяется в широких пределах  $10^{-11}$ – $10^{-17}$  с.

Для уменьшения гигроскопичности и влагопроницаемости пористых электроизоляционных материалов широко применяется их пропитка и покрытие соответствующими малогигроскопичными и маловлагопроницаемыми материалами (лаками, компаундами, глазуриями).

## 1.6.2 Термические свойства

Температура в очень большой степени влияет на электрические и механические свойства диэлектриков. Практически важные качественные показатели электроизоляционных материалов при повышении температуры в большинстве случаев ухудшаются.

Способность диэлектрических материалов выдерживать воздействие высокой температуры без потери основных свойств называется *нагревостойкостью*. Нагревостойкость определяет максимальную температуру, при которой диэлектрический материал способен *длительно* эксплуатироваться, сохраняя при этом нужный уровень своих характеристик.

Электроизоляционные материалы с точки зрения нагревостойкости делятся на *классы нагревостойкости*. Каждому классу нагревостойкости соответствует определенная предельная температура (см. табл. 1.1). Вопрос об отнесении материала к соответствующему классу решается на основе практических испытаний – обычно ускоренных испытаний на тепловое старение.

В настоящее время по рекомендации Международной электротехнической комиссии вводятся новые характеристики нагревостойкости: температурный индекс и диапазон нагревостойкости.

Таблица 1.1 – Классы нагревостойкости

Обозначение класса нагревостойкости	У	А	Е	В	Ф	Н	С
Рабочая температура, °С	90	105	120	130	155	180	Выше 180

*Температурный индекс* – это число, значение которого равно температуре в градусах Цельсия, при которой срок службы изоляционного материала составляет 20 000 часов. Температурный индекс обозначается буквами ТИ с записью после косой черты соответствующего значения температуры (например, ТИ/111).

*Диапазон нагревостойкости* (профиль нагревостойкости) – это показатель, состоящий из двух чисел, значения которых равны температурам, при которых срок службы материала составляет 5 000 и 20 000 часов, и третьего числа – температуры, при которой материал достигает срока службы 5 000 часов с вероятностью 95 %. Диапазон нагревостойкости обозначается буквами ДНС, после которых через косую черту записываются соответствующие температуры для 5 000 и 20 000 ч, и третье значение температуры записывается в скобках (например, ДНС 111/133 (129)).

Следует отметить, что в ряде случаев имеет большое значение *холодостойкость* электроизоляционных материалов, т. е. их способность работать при пониженных температурах, вплоть до криогенных. Как уже отмечалось, электроизоляционные свойства материалов при понижении температуры в большинстве случаев улучшаются. Однако многие материалы, гибкие и эластичные в нормальных условиях, при низких температурах становятся весьма хрупкими и жесткими, что создает затруднения для работы изоляции.

При определении холодостойкости сравнивают механические характеристики материала, например, деформацию при растяжении, при пониженной и нормальной температурах.

### 1.6.3 Механические свойства

Электроизоляционные материалы в процессе эксплуатации могут подвергаться значительным механическим нагрузкам, как статическим, так и динамическим.

Механическая прочность – это способность материала противостоять внешним механическим воздействиям без потери своих основных свойств. Основные статические характеристики определяются *пределами прочности* при растяжении  $\sigma_p$ , сжатии  $\sigma_c$  и изгибе  $\sigma_{и}$ . Так,

для определения  $\sigma_p$  берется стержень из диэлектрика сечением  $S$  ( $\text{м}^2$ ) и разрушается, работая на разрыв. При этом определяется сила  $F$ , при которой произошло разрушение. Тогда предел прочности при растяжении ( $\text{Н}/\text{м}^2$ )

$$\sigma_p = \frac{F}{S}. \quad (1.44)$$

Аналогично определяются  $\sigma_c$  и  $\sigma_{и.}$  Способность материалов выдерживать динамические, т. е. ударные нагрузки, характеризуется *удельной ударной вязкостью*  $\sigma_{уд.}$  Она определяется отношением энергии, затраченной на излом образца  $A$ , к площади его сечения  $S$  ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ )

$$\sigma_{уд} = \frac{A}{S}. \quad (1.45)$$

### **Контрольные вопросы**

1. Для чего необходимо знать влажностные свойства диэлектриков?
2. Какими показателями характеризуют термические свойства диэлектриков?
3. Как определяют основные механические показатели диэлектриков?

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ К МОДУЛЮ 1**

### **Лабораторная работа № 1**

#### **Исследование электропроводности диэлектриков**

Цель работы: изучение основных закономерностей прохождения тока через диэлектрик и ознакомление с методами определения его удельного объемного и удельного поверхностного сопротивлений.

#### **Основные положения**

Под действием постоянного напряжения через технический диэлектрик протекает ток утечки

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{ск}} + I_{\text{аб}}, \quad (1.46)$$

где  $I_{\text{ск}}$  и  $I_{\text{аб}}$  – соответственно сквозной и абсорбционный токи, А.

Абсорбционные токи возникают в диэлектриках в результате поляризационных процессов смещения связанных зарядов. По окончании поляризации абсорбционный ток спадает до нуля, а ток утечки становится равным сквозному току (рис. 1.38).

Сквозной ток возникает в диэлектриках за счет наличия небольшого числа свободных ионов, электронов или коллоидных частиц.

Для твердых диэлектриков как абсорбционный, так и сквозной токи имеют две составляющие. Так, например, для сквозного тока

$$I_{\text{ск}} = I_V + I_S, \quad (1.47)$$

где  $I_V$  и  $I_S$  – соответственно объемный и поверхностный токи, А.

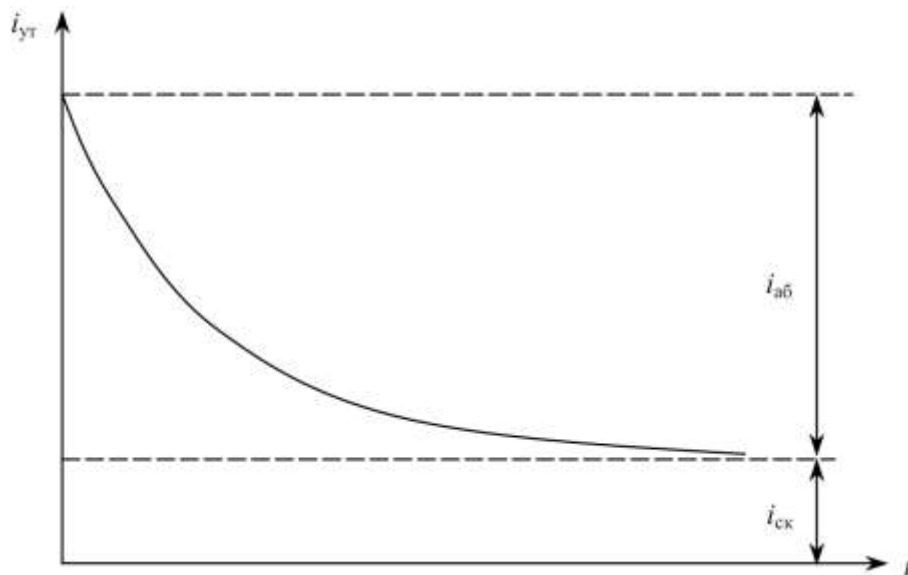


Рис. 1.38. Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени

Если объемный ток обусловлен наличием свободных зарядов в объеме диэлектрика, то поверхностный ток – наличием водорастворимых загрязнений и пленки влаги на поверхности диэлектрика (см. рис. 1.39).

Плотность объемного тока в однородном и изотропном диэлектрике определяется из выражения

$$j_V = \gamma_V E = E/\rho_V, \quad (1.48)$$



где  $\gamma_V$  – удельная объемная проводимость диэлектрика, См/м;  
 $E$  – напряженность электрического поля, В/м.  
 $\rho_V$  – удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом·м.

Объемное и поверхностное сопротивление диэлектриков, как правило, весьма высоки, поэтому для их определения используются чувствительные гальванометры, электрометры и тераомметры, позволяющие измерять токи до  $10^{-17} \dots 10^{-15}$  А. На практике для отдельного измерения объемного  $I_V$  и поверхностного  $I_S$  токов применяется, в соответствии с ГОСТ 6433.2-80, трехэлектродная система (см. рис. 1.40, а).

В случае плоского образца на обе его стороны наносятся напыленные, или прижимные, электроды. С одной стороны расположены кольцевой 2 и измерительный 1 электроды, с другой – дисковый электрод 3 (см. рис. 1.40, а). При измерении объемного сопротивления потенциал измерительного электрода 1 оказывается чуть выше потенциала кольцевого электрода 2, поэтому поверхностный ток  $I_S$  полностью отводится на кольцевой электрод. На измерительный электрод, таким образом, попадает только объемный ток  $I_V$ .

Удельное объемное сопротивление диэлектрика

$$\rho_V = R_V S/t = US/(I_V t), \quad (1.49)$$

где  $R_V$  – объемное сопротивление, Ом;  
 $S$  – площадь измерительного электрода, м<sup>2</sup>;  
 $t$  – толщина образца диэлектрика, м;  
 $U$  – измерительное напряжение, В;  
 $I_V$  – объемный ток, А.

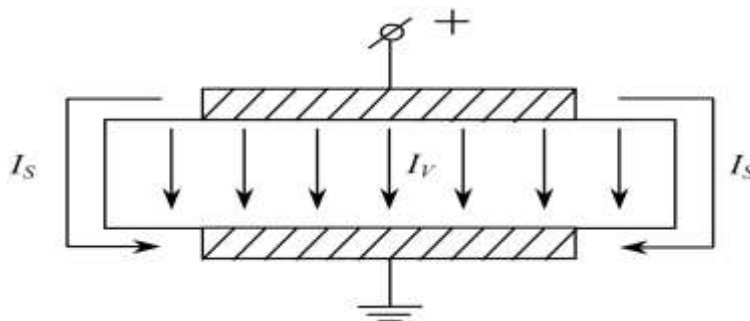


Рис. 1.39. Протекание объемного  $I_V$  и поверхностного  $I_S$  токов через диэлектрик

При измерении поверхностного сопротивления также применяется система из двух электродов, нанесенных на одну сторону плоского образца (рис. 1.40, б). Электроды имеют форму двух параллельных полос, расположенных на расстоянии  $b$ .

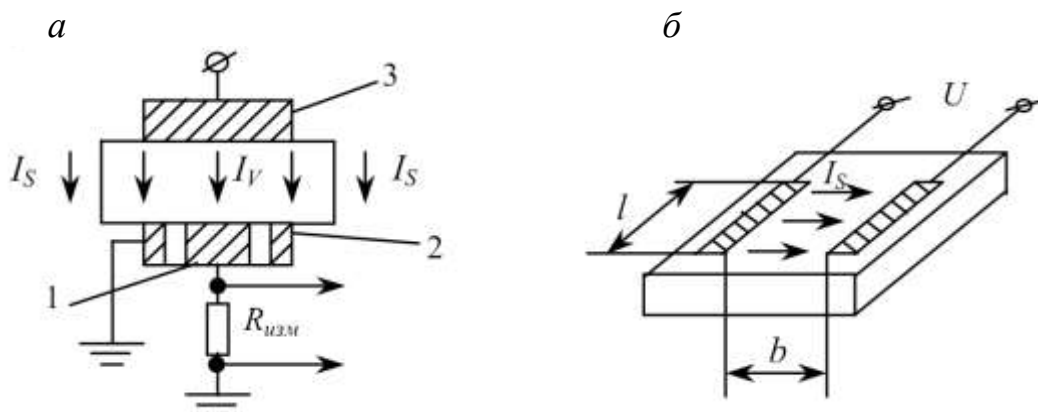


Рис. 1.40. Электродные системы:  
 а – трехэлектродная система для измерения объемного и поверхностного сопротивлений; б – двухэлектродная система для измерения поверхностного сопротивления

Удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_s = R_s l / b = Ul / (I_s b), \quad (1.50)$$

где  $U$  – измерительное напряжение, В;  
 $I_s$  – поверхностный ток, А;  
 $l$  – длина электрода, м;  
 $b$  – расстояние между электродами, м.

Если допустить, что приложенные к диэлектрику электроды обладают достаточно малым сопротивлением и диэлектрик является однородным, то без учета поверхностной проводимости для тела любой формы и размеров можно ввести понятие *приведенной длины*  $\Lambda$ .

Приведенная длина диэлектрика  $\Lambda$  имеет размерность длины и однозначно определяет соотношение параметров тела (электрической проводимости  $G$ , См, электрического сопротивления,  $R$ , Ом, и электрической емкости  $C$ , Ф) между электродами и характеристик материала.

Так, электрическая проводимость тела равна

$$G = \gamma \cdot \Lambda, \quad (1.51)$$

электрическое сопротивление

$$R = \rho/\Lambda, \quad (1.52)$$

емкость

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \Lambda. \quad (1.53)$$

Для тела длиной  $h$ , м, и сечением  $S$ , м<sup>2</sup>, произвольной конфигурации, но постоянным по всей длине тела (например, проволока или жила кабеля, диэлектрик плоского конденсатора), электрическое сопротивление

$$R = \rho \cdot h/S, \quad (1.54)$$

следовательно, приведенная длина этого тела определится по выражению

$$\Lambda = S/h. \quad (1.55)$$

Весьма важен случай, когда тело имеет форму трубы, на внешнюю и внутреннюю стороны которой нанесены электроды (например, диэлектрик цилиндрического конденсатора, изоляция одножильного коаксиального кабеля). Обозначив осевую длину электрода через  $l$ , а внутренний и внешний радиусы трубы соответственно через  $r_1$  и  $r_2$ , можем найти сопротивление между электродами, рассмотрев его как результирующее сопротивление последовательно соединенных сопротивлений  $dR$  бесконечно тонких слоев, имеющих толщину  $dx$  и радиус  $x$ . Сопротивление такого слоя составляет

$$dR = \rho \cdot dx / (2\pi \cdot x). \quad (1.56)$$

Интегрируя в пределах от  $x = r_1$  до  $x = r_2$ , получаем сопротивление

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (1.57)$$

Следовательно, в этом случае приведенная длина

$$\Lambda = 2\pi \cdot l / \ln(r_2/r_1). \quad (1.58)$$

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для измерения удельного объемного и удельного поверхностного сопротивлений твердых диэлектриков. Установка включает в себя термостат 3, тераомметр и измерительную ячейку 1 с образцом твердого диэлектрика 2 (рис. 1.41).

Тераомметр Е6-13А предназначен для измерения объемного и поверхностного сопротивлений в пределах от  $10^2$  до  $10^{13}$  Ом. Измерительное напряжение 100 В. Образец твердого диэлектрика 2 помещается в измерительную ячейку 1, имеющую трехэлектродную систему.

### Порядок выполнения работы

Поместить заданный образец твердого диэлектрика в измерительную ячейку. Измерительную ячейку подключить проводниками к тераомметру в соответствии со схемой рисунка 1.42.

Включить тераомметр и установить такой предел измерения, на котором можно измерить сопротивление (желательно использовать правую часть шкалы) при температуре окружающей среды.

В процессе поляризации сопротивление диэлектрика может значительно возрасти. Поэтому измерение сопротивления производится через 1 мин после подачи напряжения на образец.

Увеличивая температуру, произвести измерения объемных и поверхностных сопротивлений образца. Результаты измерений  $R_V$  и  $R_S$  записать в таблицу 1.2.

Поместить второй образец материала в измерительную ячейку и повторить измерения.

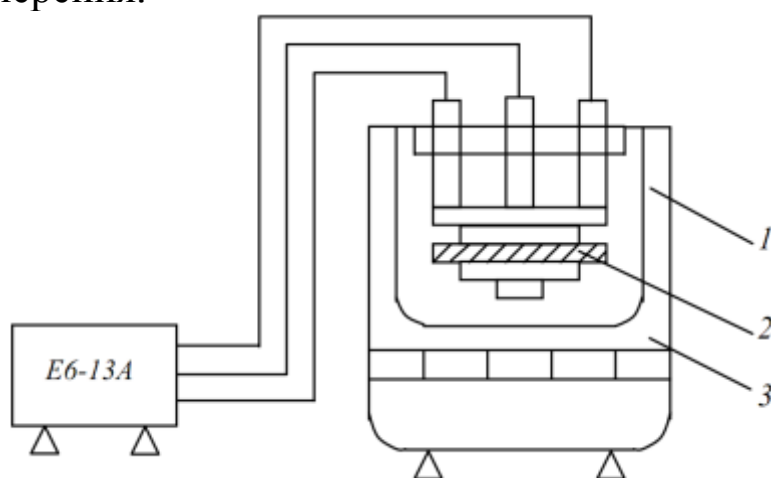


Рис. 1.41. Блок-схема лабораторной установки

Таблица 1.2 – Результаты измерений и расчетов

Образец 1, $b =$					Образец 2, $b =$				
Измерено			Вычислено		Измерено			Вычислено	
$t, ^\circ\text{C}$	$R_V,$ Ом	$R_S,$ Ом	$\rho_V,$ Ом·м	$\rho_S,$ Ом	$t, ^\circ\text{C}$	$R_V,$ Ом	$R_S,$ Ом	$\rho_V,$ Ом·м	$\rho_S,$ Ом

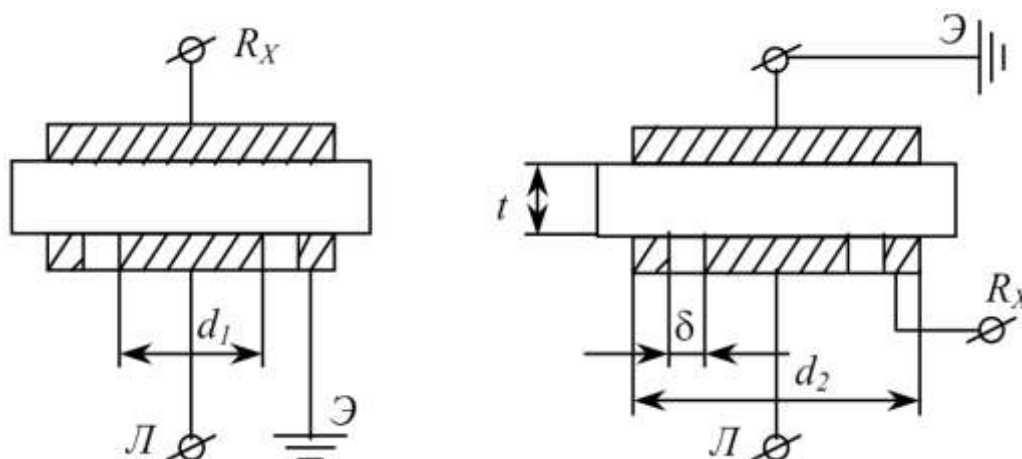


Рис. 1.42. Схема присоединения электродов к тераомметру:  
а – при измерении  $R_V$ ; б – при измерении  $R_S$

$$\rho_V = 0,785 R_V d_{cp}^2 / b, \quad (1.59)$$

и удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_S = \pi d_{cp} R_S / \delta, \quad (1.60)$$

где  $R_V$  и  $R_S$  – соответственно объемное и поверхностное сопротивления, Ом;

$d_{cp} = (d_1 + d_2) / 2$  – средний диаметр, м;

$d_1$  – диаметр измерительного электрода, м;

$b$  – толщина образца, м;

$\delta = (d_2 - d_1) / 2$  – ширина зазора между измерительным и кольцевым электродами, м;

$d_1 = 25$  мм;  $d_2 = 29$  мм.

## **Содержание отчета**

Отчет по работе должен содержать:

- название и цель работы;
- схему присоединения электродов к тераомметру;
- расчетные формулы;
- таблицу с результатами измерений и расчетов;
- графики зависимости удельных объемных и поверхностных сопротивлений диэлектриков от температуры;
- анализ полученных результатов и выводы по работе.

## **Контрольные вопросы**

1. Причины возникновения абсорбционного и сквозного токов в диэлектриках.
2. Объемный и поверхностный токи, объемное и поверхностное сопротивления.
3. Виды электропроводности газообразных диэлектриков.
4. Электропроводимость жидких диэлектриков. Зависимость электропроводимости от напряженности электрического поля.
5. Электропроводимость твердых диэлектриков различного состава.
6. Зависимость электропроводности от температуры, напряжения и влажности окружающей среды.
7. Влияние влажности среды на поверхностное сопротивление гидрофильных и гидрофобных диэлектриков.

## **Лабораторная работа № 2**

### **Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь электроизоляционных материалов**

Цель работы: определить диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых электроизоляционных материалов с помощью мостовой схемы.

### **Общие сведения**

Важнейшим свойством диэлектриков является способность их к поляризации под действием приложенного электрического напряже-

ния. Процесс поляризации представляет собой ограниченное смещение связанных зарядов в веществе или ориентацию дипольных молекул. Интенсивность процессов поляризации, протекающих в диэлектриках под действием приложенного напряжения, характеризуют относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ . Эта величина представляет собой отношение заряда  $Q$  при некотором напряжении на конденсаторе, изготовленном из данного диэлектрика, к заряду  $Q_0$ , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум.

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}, \quad (1.61)$$

где  $Q_d$  – заряд, обусловленный поляризацией вещества, разделяющего электроды.

Диэлектрическими потерями называют активную мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика. Нагрев диэлектриков приводит к ускорению процессов старения и снижению их электрической прочности.

Образец материала с диэлектрическими потерями можно представить в виде эквивалентной схемы замещения (рис. 1.43).

Углом диэлектрических потерь называют угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз  $\varphi$  между током  $I$ , протекающим через диэлектрик, и приложенным к нему напряжением  $U$  (рис. 1.43). Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем больше угол диэлектрических потерь  $\delta$  и его функция  $\operatorname{tg}\delta$ .

Мощность диэлектрических потерь в схеме (рис. 1.43) определяется формулой

$$P_\delta = U \cdot I_a. \quad (1.62)$$

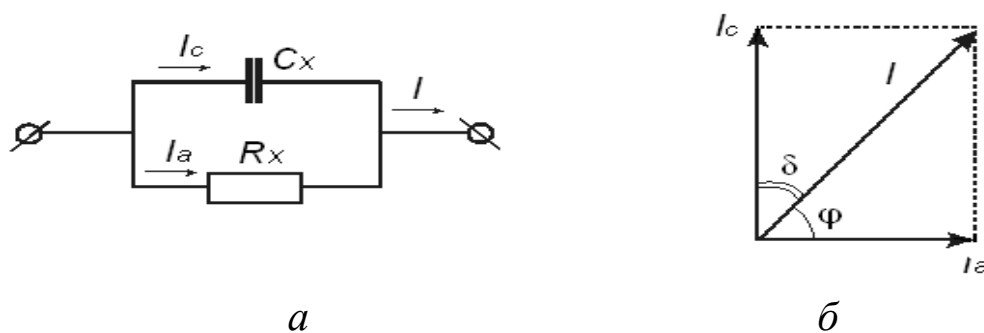


Рис. 1.43. Эквивалентная схема замещения и векторная диаграмма диэлектрика с потерями

Учитывая, что активный ток  $I_a = U/R_x$ , формулу (1.62) можно записать в виде

$$P_\delta = U^2 / R_x. \quad (1.63)$$

Согласно векторной диаграмме,

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{U / R_x}{U \omega C_x} = \frac{1}{\omega R_x C_x}, \quad (1.64)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая (циклическая) частота тока.

Выразив из (1.64)  $R_x$  и подставив его в (1.63), можно получить формулу, связывающую диэлектрические потери с величиной  $\operatorname{tg} \delta$ .

$$P_\delta = U^2 \cdot \omega \cdot C_x \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (1.65)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ) и диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon_r$ ) определяют на промышленной частоте ( $f = 50$  Гц) с помощью мостовых схем (рис. 1.44).

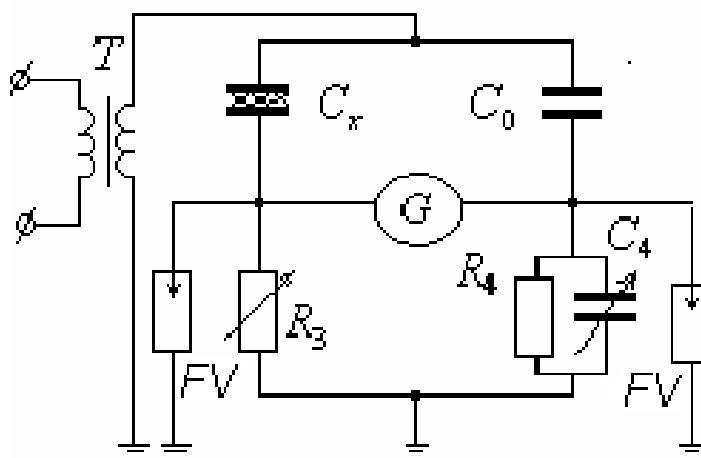


Рис. 1.44. Принципиальная схема высоковольтного моста для измерения  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ :  $T$  – повышающий трансформатор;  $FV$  – разрядники;  $C_x$  – испытуемый образец;  $C_o$  – образцовый конденсатор;  $G$  – индикатор равновесия моста

Если в схеме (рис. 1.44) ток, протекающий через индикатор  $G$ , равен нулю, то такой мост называют уравновешенным. Для уравновешенного моста произведения полных сопротивлений противоположных плеч равны между собой

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_o \cdot Z_3. \quad (1.66)$$



Это равенство называют условием равновесия моста. Из него легко можно определить параметры испытуемого образца, включенного в плечо  $x$  по параметрам остальных плеч. Например, емкость образца определится выражением

$$C_x = C_o \frac{R_4}{R_3}, \quad (1.67)$$

а тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4. \quad (1.68)$$

Величину  $\varepsilon_r$  определяют исходя из формулы плоского конденсатора

$$C_x = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_o \frac{S}{h}, \quad (1.69)$$

где  $\varepsilon_o = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;

$S$  – площадь электрода;

$h$  – толщина образца.

Из формулы (1.69) при круглом электроде диаметром  $D$ , см,

$$\varepsilon_r = 14,4 \frac{C_x h}{D^2}. \quad (1.70)$$

где  $C_x$  – емкость, пФ.

### **Общие сведения и описание некоторых электроизоляционных материалов**

*Диэлектрики* – это материалы, противодействующие электрическому полю, обладающие большим сопротивлением и не пропускающие электрический ток.

К диэлектрикам также относятся группы материалов: полимеры, волокнистые пропитанные материалы, слоистый пластик, стекло, керамика, материалы на основе слюды и др.

*Полимеры* применяют в производстве многих изделий электротехнической промышленности. Одним из наиболее применяемых материалов этой группы является поливинилхлорид (винипласт). Этот материал устойчив к действию влаги, обладает высокой стойкостью

ко многим растворителям и химически активным веществам, обладает малой нагревостойкостью.

Применяют *винипласт* для изоляции защитных оболочек, кабельных изделий, изоляции проводов в различных электрических машинах и аппаратах, работающих при промышленных частотах, в трубчатых разрядниках. Это хороший дугогасящий материал.

*Конденсаторная бумага* является наиболее тонким и высококачественным электроизоляционным видом бумаги. В пропитанном виде образует диэлектрик бумажных конденсаторов. Выпускают двух видов: *кон* – обычная и *силкон* – бумага для силовых конденсаторов. Кабельную бумагу применяют для изоляции силовых кабелей низкого и высокого напряжения.

*Картон* имеет весьма многостороннее применение в трансформаторостроении, машино- и аппаратостроении, применяется в качестве пазовой изоляции вращающихся электрических машин, изоляции магнитопроводов аппаратов. Изготавливается как для работы в воздухе, так и для работы в трансформаторном масле.

*Гетинакс* получают посредством горячей прессовки бумаги, пропитанной бакелитовой смолой. Его используют для изготовления электроизоляционных деталей электрических машин, аппаратов и приборов как низкого, так и высокого напряжения. Слоистая структура гетинакса, как и других слоистых пластиков, приводит к заметной анизотропии свойств в направлениях, перпендикулярных и параллельных слоям. Дугостойкость гетинакса, как и других пластиков, на фенолформальдегидном (бакелитовом) связующем веществе невелика.

*Текстолит* – слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоев ткани, пропитанной фенолформальдегидной смолой. Текстолит, по сравнению с гетинаксом, обладает повышенным сопротивлением к истиранию и применяется лишь в отдельных случаях для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или работающих на истирание.

*Стеклотекстолит* – слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоев стеклоткани, пропитанной различными терморезистивными связующими термовеществами. Это наиболее нагревостойкий, влагостойкий и механически прочный слоистый пластик.

*Стекло* – неорганическое аморфное вещество. Используют в качестве диэлектрика конденсаторов и в качестве изоляторов высокого напряжения.

*Органическое стекло* (полиэтилметакрилат) применяют в производстве, когда не требуется большая нагревостойкость, но нужны высокие электроизоляционные свойства, химостойкость, влагостойкость. Как газогенерирующий материал обладает хорошими дугогасящими свойствами.

*Миканит* – материал, получаемый склеиванием между собой пластинок щипаной слюды различными смолами или лаками. Используется для изоляции между коллекторными пластинками электрических машин.

*Фарфор* – материал, получаемый из глины после температурного обжига. Из него изготавливают самые разнообразные электрические изоляторы (линейные, станционные, аппаратные). Фарфор стоек к воздействию атмосферных осадков, химических веществ, слабо подвержен старению.

### **Описание испытательной установки**

Значения  $tg\delta$ , емкости и диэлектрической проницаемости образцов электроизоляционных материалов измеряют с помощью лабораторного моста Р-5026 или переносного моста МД-16. Источником переменного испытательного напряжения до 10 кВ служит трансформатор напряжения НОМ-10. Измеряемый диэлектрик или конденсатор  $C_x$  соединяют в схеме моста с образцовым конденсатором  $C_o$  (50 пФ), магазином сопротивлений  $R_3$  и магазином емкостей  $C_4$  (см. рис. 1.44). В диагональ моста включают нулевой индикатор, в который входят электронный усилитель и гальванометр.

Регулировкой величины сопротивления  $R_3$  и емкости  $C_4$  уравновешивают мост. Величина  $R_4$  выбрана такой, чтобы при частоте  $f = 50$  Гц  $tg\delta$  был равен  $C_4$ . Это соответствует  $R_4 = 10\,000/\pi = 3\,183$  Ом.

### **Порядок выполнения работы**

1. Установить испытуемый образец между электродами испытательной установки. Выйти за ограждение и только после этого подключить испытуемый образец к схеме.
2. Установить регулятор чувствительности гальванометра в положение минимума.
3. Включить в сеть мостовую схему.
4. Рукояткой регулятора чувствительности добиться расширения световой полоски гальванометра.

5. Поочередно вращая рукоятки декад  $R_3$  и  $tg\delta$ , уменьшить световую полосу гальванометра насколько это возможно.

6. Постепенно увеличивая чувствительность, добиться уравновешивания моста с помощью рукояток  $R_3$  и  $tg\delta$  при максимальной чувствительности гальванометра.

7. После окончательного уравновешивания моста снять показания  $R_3$  и  $tg\delta$ .

8. Все данные занести в таблицу 1.3.

9. Рассчитать  $C_x$ ,  $\varepsilon_r$  и  $P_\delta$  соответственно по формулам (1.67), (1.70) и (1.65).

Таблица 1.3 – Результаты измерений и расчетов

Наименование материала	$h$ , см	$D$ , см	$tg\delta$	$R_3$ , Ом	$U$ , В	$C_x$ , пФ	$\varepsilon_r$	$P_\delta$ , Вт

### Контрольные вопросы

1. Что такое относительная диэлектрическая проницаемость, какие процессы в диэлектрике она характеризует? Как численно определяется?

2. Что такое диэлектрические потери,  $tg\delta$  и какие процессы в диэлектрике они характеризуют?

3. Чем опасны активные потери мощности в диэлектрике?

4. Какими электрическими элементами замещается диэлектрик с потерями?

5. Каковы условия равновесия мостовой схемы?

### Лабораторная работа № 3

#### Электрическая прочность твердых диэлектриков

Цель работы: ознакомиться с порядком испытаний твердых диэлектриков на электрическую прочность, определить влияние толщины диэлектрика на его электрическую прочность.

#### Общие сведения

При увеличении напряжения, приложенного к изоляции в электрической установке, может произойти электрический пробой. В результате пробоя диэлектрик оказывается непригодным к дальнейшему

применению (теряет электроизоляционные свойства материала). Напряжение, при котором происходит пробой, называют пробивным и обозначают  $U_{np}$ .

Основной характеристикой электроизоляционного материала служит электрическая прочность  $E_{np}$ , под которой понимают способность электроизоляционных материалов противостоять электрическому пробую. Электрическую прочность характеризуют величиной минимальной напряженности однородного электрического поля, приводящей к пробую

$$E_{np} = U_{np} / h, \quad (1.71)$$

где  $h$  – толщина диэлектрика в месте пробоя, см.

В эксплуатационных условиях поле чаще всего не является однородным, поэтому на практике находят электрическую прочность на образцах в условиях неоднородного поля. Полученное значение называют *средней пробивной напряженностью*. Эта величина существенно зависит от структуры твердых диэлектриков, толщины образца и его площади, от свойств окружающей среды и других факторов. Поэтому для средней напряженности необходимо указывать такие условия, при которых проводили испытания.

При испытаниях постоянным током за пробивное принимается постоянное напряжение на образце в момент пробоя, при переменном синусоидальном – указывается амплитудное значение пробивного напряжения  $U_{np\ max} = \sqrt{2}U_{np}$ .

Пробой твердых диэлектриков может быть вызван электрическими или тепловыми процессами, возникающими под действием поля. Он зависит от характера электрического поля (постоянное, переменное, импульсное), частоты (высокой или низкой), наличия в диэлектрике дефектов, условий охлаждения, времени воздействия напряжения.

Электрический пробой вызван процессами ударной ионизации электронами, разгоняемыми приложенным электрическим полем. Электроны, достигшие определенной критической скорости, производят разрушение молекул диэлектрика, отрывая от них новые свободные электроны. Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала.

Тепловой пробой является следствием разогрева диэлектрика, вызванного диэлектрическими потерями, при приложении электрического поля. При этом происходит разогрев до температур, соответствующих расплавлению и обугливанию материала.

Одним из широко распространенных твердых диэлектриков является бумага конденсаторная (толщина 5–30 мкм) и кабельная (толщина 15–240 мкм). Бумагу используют главным образом для изоляции кабелей, конденсаторов и электрических аппаратов. Для производства бумаги применяют древесную целлюлозу, которая имеет волокнистую структуру. Это обуславливает наличие большой пористости, объем пор непропитанной бумаги достигает до 40–50 %.

Для увеличения электрической прочности бумаги ее пропитывают изоляционными маслами. При пропитке жидкий диэлектрик заполняет поры, увеличивая таким образом электрическую прочность.

На электрическую прочность тонкой конденсаторной бумаги оказывают большое влияние проводящие включения (частицы угольной пыли, металлов или их соединений), число которых может достигать до 600–1 000 на 1 м<sup>2</sup> бумаги. Такие частицы занимают всю толщину листа и поэтому электрическую прочность образца, который состоит из двух листов, определяют практически одним листом. При увеличении числа слоев бумаги каждый новый слой перекрывает включения других слоев, вероятность совпадения включений в слоях уменьшается и пробивная напряженность растет (рис. 1.45, а).

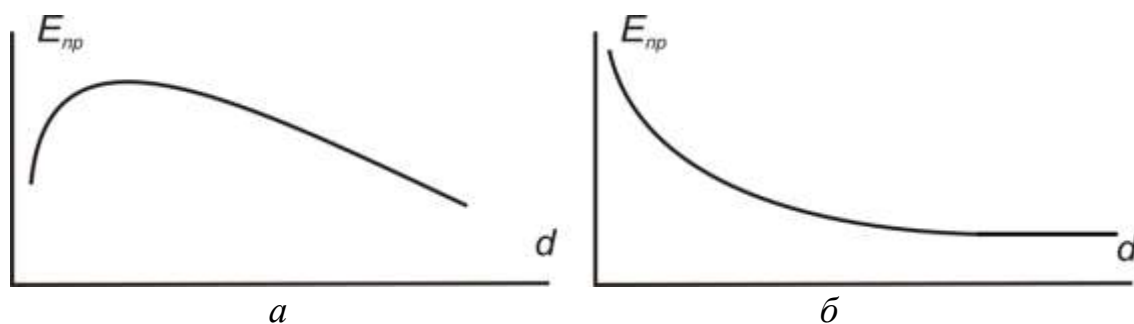


Рис. 1.45. Зависимости электрической прочности от толщины образца:  
а – для конденсаторной бумаги; б – для кабельной бумаги

Далее с увеличением толщины образца усиливается неоднородность структуры, возрастает количество слабых мест, газовых включений и снижается электрическая прочность как в однородном, так и в неоднородном полях.

В зависимости от электрической прочности для кабельной бумаги (рис. 1.45, б) отсутствует возрастающая часть, так как вследствие большой толщины кабельной бумаги наличие там проводящих частиц, которые шунтируют весь лист, маловероятно (рис. 1.45, б).

### Описание испытательной установки

Электрическую прочность твердого диэлектрика определяют при воздействии переменного напряжения, источником которого служит установка высокого напряжения (рис. 1.46).

Изменение подводимого напряжения осуществляют регулятором напряжения. Испытуемый образец включают последовательно с резистором  $R_3$ , который служит для ограничения тока в цепи при пробое образца диэлектрика.

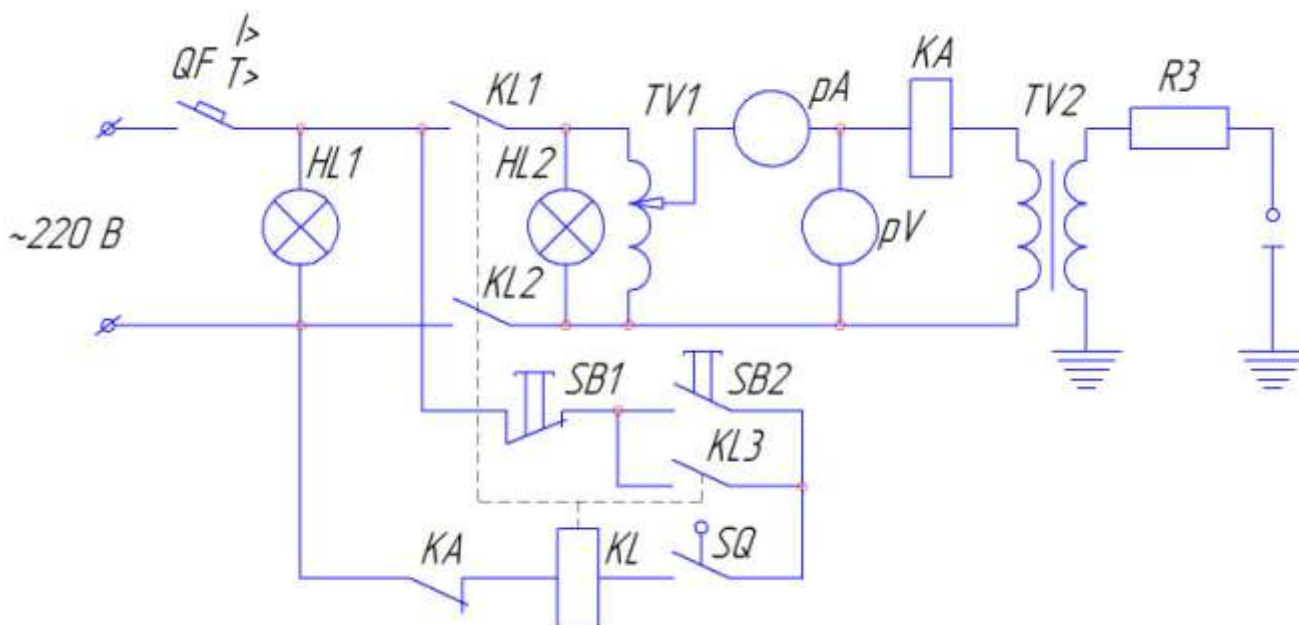


Рис. 1.46 – Принципиальная схема испытательной установки на переменном напряжении:  $QF$  – автоматический выключатель;  $pA$  – амперметр;  $pV$  – вольтметр;  $SB1$  – кнопка «Стоп»;  $SB2$  – кнопка «Пуск»;  $TV1$  – повышающий трансформатор;  $TV2$  – регулятор напряжения;  $HL_1, HL_2$  – сигнальные лампы;  $KA$  – реле тока;  $SQ$  – блокировка;  $R_3$  – защитное сопротивление;  $KL$  – промежуточное реле

### Порядок выполнения работы

1. Заготовить образцы конденсаторной бумаги. Количество слов и число образцов задается преподавателем.
2. Замерить толщину всех образцов с помощью микрометра.

3. Замерить пробивное напряжение образца. При испытаниях напряжение плавно повышать до пробоя. Величину амплитудного пробивного напряжения определяют по показаниям вольтметра, установленного на стороне низкого напряжения трансформатора, и коэффициенту трансформации по формуле

$$U_{np\ max} = \sqrt{2}k_T U_{1\ ср}, \quad (1.72)$$

где  $k_T$  – коэффициент трансформации испытательного трансформатора.

4. Определить амплитудное значение средней пробивной напряженности по формуле

$$E_{np\ max} = U_{np\ max} / h_{ср}. \quad (1.73)$$

5. Результаты занести в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты измерений и расчетов

№ п/п	Толщина образца, мм	$U_I$ , В	$U_{np\ max}$ , кВ	$E_{np\ max}$ , кВ/мм
1				
.....				

6. По данным таблицы 1.4 построить зависимости амплитудных значений среднего пробивного напряжения и средней пробивной напряженности от толщины диэлектрика.

### Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая прочность диэлектриков?
2. Объяснить причину снижения электрической прочности диэлектрика с увеличением толщины.
3. Объяснить работу схемы испытательной установки.
4. Какими процессами в диэлектрике вызван электрический пробой?
5. Виды пробоя твердого диэлектрика.



## Лабораторная работа № 4

### Исследование статистических закономерностей пробоя трансформаторного масла

Цель работы: научиться определять электрическую прочность трансформаторного масла с применением теории вероятностей.

#### Общие сведения

Для повышения электрической прочности изоляции трансформаторов, кабелей и бумажных конденсаторов применяют жидкие диэлектрики (трансформаторное и конденсаторное масла, совол, октол, кремний-органические жидкости).

Трансформаторное масло используют как диэлектрик в различной высоковольтной аппаратуре. В трансформаторах масло является также охлаждающей средой, в масляных выключателях – дугогасящей средой. Масло характеризуется достаточно высокой электрической прочностью (12–20 кВ/мм), малыми диэлектрическими потерями, удовлетворительной теплопроводностью. Оно, как и другие жидкие диэлектрики, способно восстанавливать свою электрическую прочность после пробоя. Это масло можно очищать и сушить, тем самым восстанавливая его электроизоляционные свойства.

Трансформаторное масло стареет (окисляется) под влиянием кислорода воздуха, высокой температуры и солнечного света. Масло обладает гигроскопичностью, понижающей его электрическую прочность.

Одной из наиболее важных электрических характеристик жидких диэлектриков является их электрическая прочность, характеризующаяся средним значением пробивной напряженности

$$E_{\text{пр ср}} = U_{\text{пр ср}} / h, \quad (1.74)$$

где  $U_{\text{пр ср}}$  – среднее пробивное напряжение, полученное из серии пробоев;  
 $h$  – толщина испытываемого слоя жидкого диэлектрика.

Величина пробивного напряжения зависит от формы и размеров электродов, расстояния между ними, давления и температуры жидкого диэлектрика, характера приложенного напряжения, степени загрязнения водой, волокнами и другими примесями. Снижение элек-

троизоляционных свойств жидкого диэлектрика может привести к аварии в электрической установке, поэтому для обеспечения нормальной работы аппаратуры периодически проверяют качество диэлектрика и в первую очередь его электрическую прочность.

Для жидких диэлектриков при определении пробивного напряжения характерна плохая воспроизводимость результатов. Пробои технически чистого масла подчиняются статистическим законам. При различии отдельных значений электрической прочности среднее и минимальное значения для масла одинаковой степени частоты, полученные из большого числа опытов, представляют собой стабильные воспроизводимые величины. Экспериментальными исследованиями установлено, что плохая воспроизводимость результатов в основном объясняется наличием примесей, оказывающих большое влияние на процесс пробоя жидких диэлектриков. Так, например, технически чистое трансформаторное масло имеет разброс значений пробивного напряжения 30–50 %, а то же масло, но предварительно обработанное центрифугой, – 5–10 %.

Наибольший разброс имеет место в однородных полях. При воздействии приложенного напряжения в масле происходит поляризация, а затем и ориентация частиц примесей по электрическому полю. При этом между электродами образуются проводящие мостики, снижающие электрическую прочность.

Несмотря на наличие случайных факторов, определяющих дискретные значения пробивного напряжения трансформаторного масла, при большом числе испытаний одних и тех же образцов среднее пробивное напряжение и разброс являются стабильными величинами для одного и того же масла и могут с достаточной точностью служить характеристикой жидкого диэлектрика.

Из опытных данных среднее значение пробивного напряжения определяют по формуле

$$U_{np\ cр} = \frac{\sum_{i=1}^k U_{np\ i} \cdot n_i}{n}, \quad (1.75)$$

где  $U_{np\ i}$  – дискретное значение пробивного напряжения;

$n_i$  – число пробоев при напряжении  $U_{np\ i}$ ;

$n$  – полное число испытаний.

Если определить относительное число пробоев с пробивным напряжением

$$\rho_i = n_i / n, \quad (1.76)$$

то при достаточно большом  $n$   $\rho_i$  приблизительно будет равно вероятности пробоя диэлектрика при напряжении  $U_{пр i}$ . Зависимость  $\rho_i = f(U)$  называется дифференциальной функцией распределения вероятностей пробивного напряжения (рис. 1.47).

С помощью дифференциальной кривой распределения вероятностей можно определить вероятность пробоя в данном интервале напряжений.

Вероятность пробоя диэлектрика при напряжении, равном или меньшем  $U_{пр i}$ , определяют по формуле

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{n}. \quad (1.77)$$

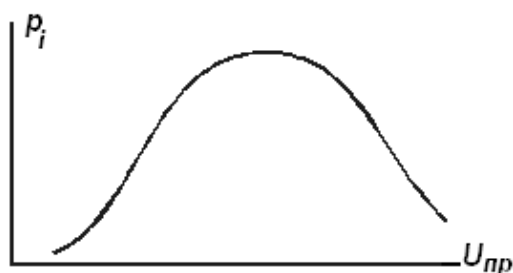


Рис. 1.47. Дифференциальная кривая распределения вероятностей пробивного напряжения

Зависимость  $P_i = f(U)$  называют функцией распределения вероятностей пробивных напряжений, а ее график – интегральной кривой распределения вероятностей (рис. 1.48).

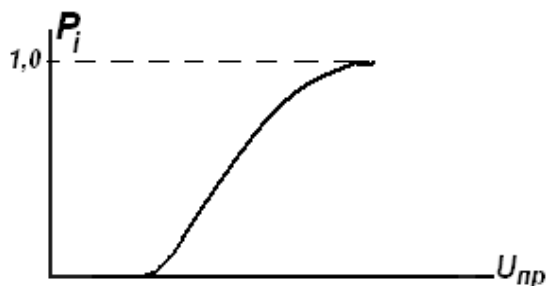


Рис. 1.48. Интегральная кривая распределения вероятности пробивного напряжения

Разброс пробивных напряжений относительно среднего значения характеризуется абсолютной величиной среднего квадратичного отклонения

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k (U_{np i} - U_{np cp})^2 \cdot n_i / n} \quad (1.78)$$

или относительной, в процентах от среднего пробивного напряжения

$$\sigma_{\%} = \frac{\sigma}{U_{np cp}} \cdot 100 \% . \quad (1.79)$$

### Описание испытательной установки

Электрическую прочность трансформаторного масла определяют на специальных аппаратах испытания АИИ-70, АИМ-90 или с помощью установок, собранных на базе испытательных трансформаторов (рис. 1.49).

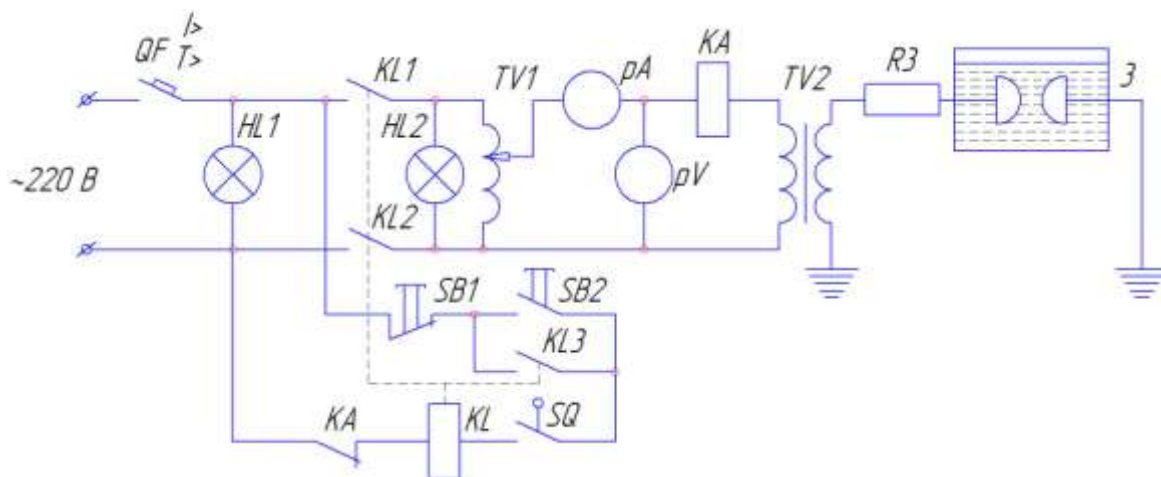


Рис. 1.49. Принципиальная схема испытательной установки на переменном напряжении: *QF* – автоматический выключатель; *pA* – амперметр; *pV* – вольтметр; *SB1* – кнопка «Стоп»; *SB2* – кнопка «Пуск»; *TV1* – испытательный трансформатор; *TV2* – регулятор напряжения; *HL1*, *HL2* – сигнальные лампы; *KA* – реле тока; *SQ* – блокировка; *R<sub>3</sub>* – защитное сопротивление; *KL* – промежуточное реле; *3* – ячейка с испытуемой жидкостью

Ячейка с испытуемой жидкостью представляет собой сосуд емкостью 500 см<sup>3</sup> с двумя сферическими латунными электродами радиусом 25 мм. Зазор между электродами должен составлять 2,5 мм.

Испытывают масло при плавном подъеме напряжения до пробоя. После каждого пробоя из зазора между электродами удаляют частицы сажи.

## Порядок выполнения работы

1. Произвести 50 пробоев масла в стандартном разряднике.
2. Результаты измерений расположить в порядке возрастания от минимального значения  $U_{np}$  до максимального (вариационный ряд). Этот вариационный ряд  $U_{np}$  разбить на равные интервалы, число которых обычно выбирают равным 8–12.
3. Определить число пробоев  $n_i$ , попадающее в каждый интервал пробивных напряжений.
4. Суммировать  $n_i$  каждого интервала со всеми значениями предыдущих интервалов (определить  $\Sigma n_i$ ).
5. По формулам (1.76) и (1.77) определить  $\rho_i$  и  $P_i$  для каждого интервала  $U_{np}$ .
6. Результаты расчетов по предыдущим пунктам представить в виде таблицы 1.5.

Таблица 1.5 – Результаты измерений и расчетов

№ п/п	$U_{np\ i}$ , кВ	$n_i$	$\Sigma n_i$	$\rho_i$	$P_i$

7. По результатам, приведенным в таблице 1.5, построить дифференциальную и интегральную кривые распределения вероятностей пробивного напряжения.
8. Определить  $U_{np\ ср}$ ,  $E_{np\ ср}$ ,  $\sigma$  и  $\sigma \%$  по соответствующим формулам (1.75), (1.74), (1.78) и (1.79).
9. С помощью полученных значений  $E_{np\ ср}$  и  $\sigma \%$  сделать вывод о качестве испытанного трансформаторного масла.

## Контрольные вопросы

1. Каков характер пробоя трансформаторного масла?
2. От чего зависит электрическая прочность трансформаторного масла?
3. Какова причина статистического разброса пробивных напряжений трансформаторного масла?
4. Что такое  $\sigma$  и каковы единицы его измерения?
5. Что можно определить с помощью дифференциальной и интегральной кривых вероятностей?

# РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ К МОДУЛЮ 1

## Контрольное задание № 1

Диэлектрик плоского конденсатора состоит из  $n$  слоев с соответствующими толщинами  $d_i$ , диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_i$ , проводимостью  $\gamma_i$ . Этот диэлектрик подключен под напряжение величинной  $U$ . Постройте график распределения напряженностей в слоях при постоянном и переменном напряжениях. Оцените электрическую прочность конструкции. Исходные данные приведены в таблице 1.6.

В многослойных диэлектриках, включенных под переменное напряжение, напряженность электрического поля распределяется по слоям обратно пропорционально их диэлектрической проницаемости.

Так, для диэлектрика, состоящего из двух слоев (рис. 1.50), напряженности электрического поля в обоих слоях определяются из следующих выражений:

$$E_1 = \varepsilon_2 \cdot U / (d_2 \varepsilon_1 + d_1 \varepsilon_2); \quad (1.80)$$

$$E_2 = \varepsilon_1 \cdot U / (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1), \quad (1.81)$$

где  $U$  – полное напряжение между электродами.

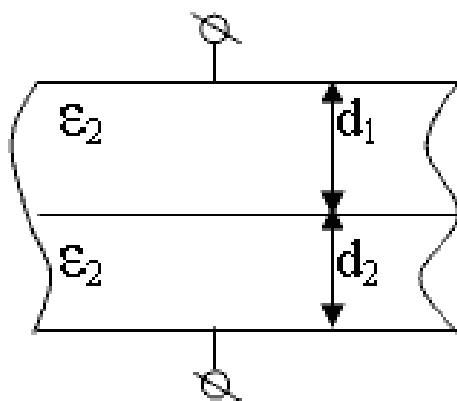


Рис. 1.50. Двухслойный диэлектрик

Выбор варианта контрольного задания осуществляется по таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Варианты заданий

Номер варианта	n	$\varepsilon_1$	$\gamma_1, 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	$d_1, \text{см}$	$E_{\text{пр}1}, \text{кВ}/\text{мм}$	$\varepsilon_2$	$\gamma_2, 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	$d_2, \text{см}$	$E_{\text{пр}2}, \text{кВ}/\text{мм}$	$\varepsilon_3$	$\gamma_3, 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	$d_3, \text{см}$	$E_{\text{пр}3}, \text{кВ}/\text{мм}$	U, кВ
1	2	1	$1 \cdot 10^{-14}$	1	3	2,5	$2 \cdot 10^{-15}$	3	50					20
2	2	2,6	$1 \cdot 10^{-10}$	2	60	10	$1 \cdot 10^{-14}$	2	10					40
3	3	5	$2 \cdot 10^{-16}$	1	25	1	$1 \cdot 10^{-13}$	5	3	5	$1 \cdot 10^{-13}$	2	25	50
4	3	6	$3 \cdot 10^{-16}$	1	20	1	$2 \cdot 10^{-14}$	3	3	6	$2 \cdot 10^{-14}$	3	20	4
5	3	8	$1 \cdot 10^{-13}$	0,1	70	4	$1 \cdot 10^{-12}$	0,3	40	8	$1 \cdot 10^{-14}$	1	70	0,7
6	2	1	$1 \cdot 10^{-12}$	0,5	3	6	$2 \cdot 10^{-15}$	0,1	20					0,5
7	3	2	$1 \cdot 10^{-15}$	0,2	30	2,5	$3 \cdot 10^{-13}$	1	45	2	$3 \cdot 10^{-13}$	4	30	10
8	3	9	$1 \cdot 10^{-17}$	0,3	15	2	$3 \cdot 10^{-10}$	1,5	40	9	$3 \cdot 10^{-10}$	3	15	12
9	2	3,3	$2 \cdot 10^{-13}$	0,3	35	2,1	$3 \cdot 10^{-10}$	1,2	25					8
10	2	3,5	$3 \cdot 10^{-11}$	0,6	25	6	$5 \cdot 10^{-10}$	0,3	15					6
11	3	2,6	$1 \cdot 10^{-14}$	1	3	2,5	$1 \cdot 10^{-13}$	3	50	9	$1 \cdot 10^{-13}$	3	25	40
12	3	1	$1 \cdot 10^{-10}$	2	60	10	$2 \cdot 10^{-15}$	2	3	2	$2 \cdot 10^{-14}$	1	30	4
13	2	1,6	$2 \cdot 10^{-16}$	1	25	3	$1 \cdot 10^{-14}$	5	4					50
14	2	2,6	$3 \cdot 10^{-16}$	1	20	1	$1 \cdot 10^{-13}$	3	10					60
15	3	5	$1 \cdot 10^{-13}$	0,1	70	4	$2 \cdot 10^{-14}$	0,3	50	6	$1 \cdot 10^{-14}$	1	45	10
16	3	6	$1 \cdot 10^{-12}$	0,5	3	6	$1 \cdot 10^{-12}$	0,1	10	5	$2 \cdot 10^{-13}$	3	20	0,7
17	3	8	$1 \cdot 10^{-15}$	0,2	30	2,5	$2 \cdot 10^{-15}$	1	3	8	$3 \cdot 10^{-10}$	4	35	12
18	2	1	$1 \cdot 10^{-17}$	0,3	15	2	$3 \cdot 10^{-13}$	1,5	3					15
19	2	2	$2 \cdot 10^{-13}$	0,3	35	2,1	$3 \cdot 10^{-10}$	1,2	40					40
20	2	9	$3 \cdot 10^{-11}$	0,6	25	6	$3 \cdot 10^{-10}$	0,3	20					60
21	3	3,3	$1 \cdot 10^{-10}$	0,3	60	2,1	$5 \cdot 10^{-10}$	3	45	5	$1 \cdot 10^{-13}$	2	70	0,5
22	2	3,5	$2 \cdot 10^{-16}$	0,3	25	6	$1 \cdot 10^{-13}$	0,3	40					20
23	2	2,6	$3 \cdot 10^{-16}$	0,6	20	2,5	$3 \cdot 10^{-10}$	0,1	25					30
24	2	1	$1 \cdot 10^{-13}$	1	70	10	$5 \cdot 10^{-10}$	1	15					40
25	2	1,5	$1 \cdot 10^{-12}$	2	3	5	$1 \cdot 10^{-13}$	1,5	25					10

В общем случае для многослойного плоского конденсатора напряженности в слоях и напряжение на них определяют по следующим формулам:

$$E_j = U / \varepsilon_j \sum_{j=1}^n (d_j / \varepsilon_j); \quad (1.82)$$

$$U_j = E_j d_j, \quad (1.83)$$

где  $n$  – число слоев.

Для расчета установившегося поля в многослойной изоляции, работающей под постоянным напряжением, в предыдущие формулы следует вместо значения  $\varepsilon$  подставлять соответствующие значения объемной удельной проводимости  $\gamma$  материалов соответствующих слоев.

Для оценки электрической прочности конструкции необходимо построить ступенчатый график распределения напряженностей по слоям диэлектрика при заданном напряжении, на котором по оси абсцисс последовательно, один за другим откладываются значения толщины слоев диэлектрика, по оси ординат – величина напряженности для соответствующего слоя. Количество ступеней соответствует количеству слоев конструкции. Графики для постоянного и переменного напряжения строятся отдельно. После построения графиков необходимо проанализировать полученный результат и написать вывод с информацией о том, выдержит данная конструкция приложенное к ней напряжение или нет.



## МОДУЛЬ 2

### ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### Цели и задачи изучения модуля 2

В этом разделе рассматриваются основные виды электроизоляционных материалов: газообразных, жидких и твердых. Приводятся их основные электрические и физические характеристики, способы изготовления и области применения.

После изучения модуля 2 вы будете знать:

- основные виды электроизоляционных материалов и их сравнительные характеристики;
- как изготавливаются и где применяются те или иные электроизоляционные материалы.

После изучения модуля 2 вы будете уметь:

- выбирать материалы в соответствии с областью их применения.

#### 2.1 Газообразные электроизоляционные материалы

##### 2.1.1 Воздух. Вакуум

Самой распространенной высоковольтной изоляцией является атмосферный воздух. Основные преимущества воздушной изоляции:

- экономичность;
- низкие электропроводность и диэлектрические потери;
- способность к самовосстановлению.

Основной недостаток воздуха как изоляции – низкая электрическая прочность. Пробивная напряженность воздуха в однородном поле составляет всего лишь 30 кВ/см, что в десятки раз ниже электрической прочности жидких и твердых диэлектриков. Поэтому габариты воздушных линий (ВЛ) электропередачи могут достигать огромных размеров. На рисунке 2.1 приведены габариты воздушных промежутков на опоре ВЛ-1 150 кВ, а на рисунке 2.2 – разрядная характеристика воздуха.

Как изоляция воздух используется на линиях классов напряжения 0,4–1 150 кВ, в открытых и закрытых распределительных устройствах, на подстанциях.

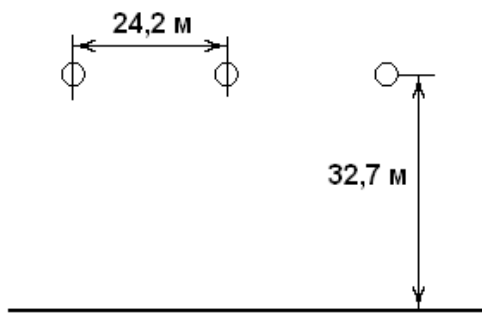


Рис. 2.1. Основные габариты воздушной изоляции на опоре ВЛ-1 150 кВ

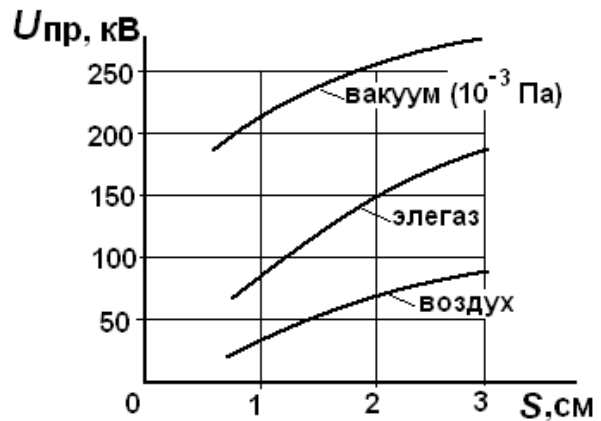


Рис. 2.2. Зависимости пробивного напряжения различных газов от расстояния между электродами в однородном поле

Кроме того, воздух является относительно неплохой дугогасящей средой. В качестве дугогасящей среды воздух используется в воздушных выключателях на классы напряжения 20–150 кВ. В них воздух под давлением 2,0–4,0 МПа подается в дугогасительную камеру (рис. 2.3) и создает мощное дугогасящее продольное или поперечное дутье.

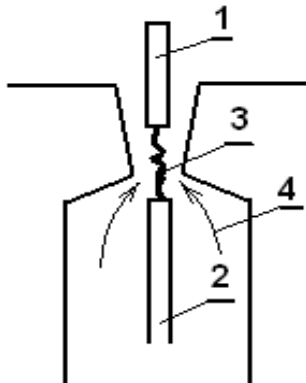


Рис. 2.3. Пример дугогасительной камеры выключателя с продольным дутьем: 1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт; 3 – дуга; 4 – сжатый воздух

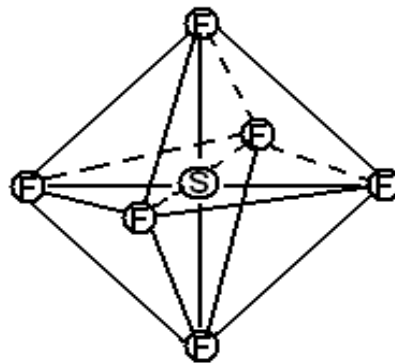


Рис. 2.4. Строение молекулы элегаза

В соответствии с законом Пашена электрическая прочность воздуха при очень низких давлениях существенно возрастает. Поэтому вакуум является хорошим электроизоляционным материалом (рис. 2.2). Из-за высокой стоимости вакуумная изоляция используется

лишь в коммутационных аппаратах. Применяемые в электроэнергетике вакуумные выключатели с номинальным напряжением 6–110 кВ имеют малые габариты, высокую надежность работы и большой ресурс коммутаций. Гашение дуги в вакуумных выключателях происходит практически мгновенно за счет диффузии зарядов, образующих плазму электрической дуги.

### 2.1.2 Элегаз и другие высокопрочные газы

*Элегаз*, или шестифтористая сера ( $\text{SF}_6$ ), – это бесцветный, нетоксичный газ, обладающий высокой молекулярной массой. Электрическая прочность элегаза в 2,5 раза выше электрической прочности воздуха (см. рис. 2.2). Он в пять раз тяжелее воздуха, имеет температуру сжижения  $-64\text{ }^\circ\text{C}$  (при нормальном давлении) и не разлагается при нагреве до  $+800\text{ }^\circ\text{C}$ .

Высокая электрическая прочность элегаза связана с большим размером молекул и их сложной структурой (см. рис. 2.4), а также с тем, что молекулы элегаза легко захватывают свободные электроны с образованием тяжелых отрицательных ионов. Электроны при соударении со сложной молекулой элегаза тратят большую часть своей энергии только на возбуждение колебаний в ней или вращение, а не на ионизацию. Все это снижает вероятность ударной ионизации.

Элегаз обладает хорошей теплопроводностью и примерно в пять раз эффективней, чем воздух, гасит силовую электрическую дугу в выключателе. Элегаз не горюч и пожаробезопасен.

Все это позволило широко использовать элегаз в комплектных распределительных устройствах элегазовых (КРУЭ), а также в отдельно выпускаемых промышленностью выключателях, измерительных трансформаторах. За рубежом элегаз также применяется в кабелях и силовых трансформаторах.

КРУЭ собираются из отдельных модулей: высоковольтных вводов, разъединителей, соединительных шин, трансформаторов напряжения и тока, выключателей. При этом получается компактное по размерам устройство. Положение внутренних электродов шин фиксируется с помощью изоляторов-распорок из эпоксидного компаунда (см. рис. 2.5).

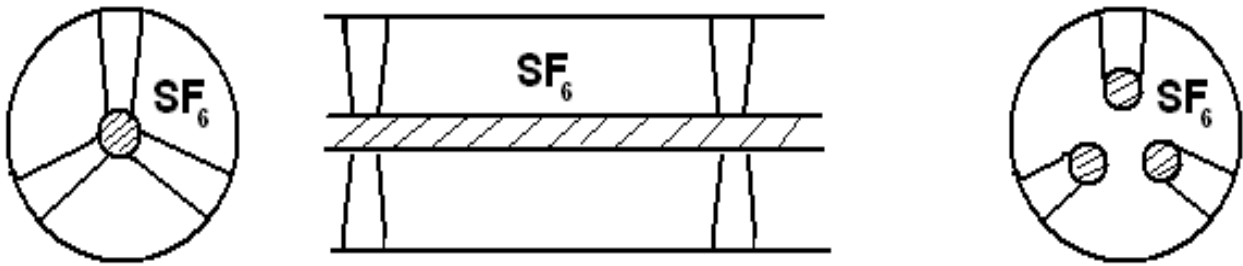


Рис. 2.5. Примеры расположения шин в ячейках КРУЭ

После сборки КРУЭ производится откачка из него воздуха и заполнение ячеек элегазом.

Элегазовые распредустройства обладают следующими преимуществами по сравнению с открытыми:

- существенно уменьшаются габариты распредустройства;
- повышается надежность работы, так как токоведущие части и изоляторы не контактируют с воздухом и загрязнениями;
- повышается безопасность обслуживания, так как токоведущие части находятся внутри заземленных труб;
- КРУЭ работают бесшумно и не создают радиопомех.

Основным недостатком элегаза является его относительно высокая температура сжижения, что не позволяет использовать в КРУЭ достаточно высокое давление. Рабочее давление обычно не превышает 0,3–0,4 МПа.

В элегазовых выключателях применяют два принципа дугогашения:

1. Дуга охлаждается элегазом при перетоке газа из резервуара высокого давления (около 2 МПа) в резервуар низкого давления (0,3 МПа). При этом, чтобы избежать перехода элегаза в жидкость, бак высокого давления необходимо подогревать.

2. Используется принцип автокомпрессии. На очень короткое время, в момент гашения дуги, газ сжимается между поршнем и перегородкой примерно до 1 МПа с помощью привода (см. рис. 2.6). Кроме того, повышается давление и за счет увеличения температуры элегаза в момент горения дуги. В этом случае не требуется подогрев, что существенно повышает надежность работы выключателя.

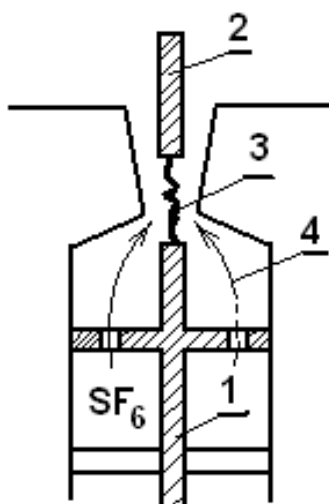


Рис. 2.6. Конструкция дугогасительной камеры выключателя с автокомпрессией: 1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт; 3 – дуга; 4 – сжатый элегаз

В настоящее время КРУЭ освоены на классы напряжения 10–800 кВ. В нашей стране КРУЭ работают на напряжениях 110 и 220 кВ (Мосэнерго) и на 500 кВ (Бурейская ГЭС). По проекту, на Красноярской ТЭЦ-3 будет введено КРУЭ-110 кВ. В соответствии с Основными направлениями научно-технической политики в нашей стране при напряжениях 110 кВ и выше на вновь сооружаемых и реконструируемых объектах должны устанавливаться только элегазовые выключатели.

За рубежом работают КРУЭ-800 кВ, выпускаются элегазовые трансформаторы на напряжении 154 кВ. Кроме того, элегаз применяется в кабелях высокого напряжения. Кабели с элегазом имеют малую емкость, малые диэлектрические потери, хорошее охлаждение, что дает возможность передавать по ним значительную мощность.

Существенный недостаток элегаза – его высокая стоимость.

*Дихлордифторметан*, или Хладон-12 ( $CCl_2F_2$ ), имеет электрическую прочность в 2,4 раза выше, чем у воздуха. Он существенно дешевле элегаза, но имеет слишком высокую температуру сжижения  $t_{сжизж} = -30\text{ }^\circ\text{C}$ . Что и ограничивает его применение в энергетике.

*Перфторированные углеводороды* – это углеводороды, у которых атомы водорода полностью замещены атомами фтора. Например:  $CF_4$ ,  $C_4F_6$ ,  $C_5F_{10}$ , ...  $C_{14}F_{24}$ . Чем выше молекулярная масса газа, тем выше его электрическая прочность. Так,  $C_5F_{10}$  обладает электрической прочностью в 4,3 раза выше, чем у воздуха, однако его

температура сжижения +22 °С. Электрическая прочность  $C_{14}F_{24}$  достигает 10  $E_{np}$  воздуха, но он существует в виде газа только в раскаленном состоянии. Все это, а также высокая цена, ограничивают применение перфторированных углеводородов в электроэнергетике.

*Азот.* Имеет характеристики примерно такие же, как у воздуха, но отсутствие кислорода не дает развиваться процессам коррозии и процессам окисления. Применяется в газонаполненных кабелях 35–220 кВ при давлениях от 0,15 до 0,60 МПа.

*Водород.* Не является высокопрочным газом, так как его электрическая прочность ниже, чем у воздуха. Водород в 16 раз легче воздуха, а его коэффициент теплопроводности в 7 раз выше, чем у воздуха. Поэтому водород является замечательной охлаждающей средой. Как охлаждающая среда он используется в крупных турбогенераторах. При этом вентиляционные потери на трение снижаются почти в 10 раз, что существенно повышает коэффициент полезного действия генератора. Происходит также снижение вентиляционных шумов и вибрации турбогенератора. Основной недостаток водорода – пожаро- и взрывоопасность.

## Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества и недостатки воздушной изоляции.
2. В каких видах электрооборудования применяется элегаз?
3. Чем объяснить высокую прочность элегаза?

## 2.2 Жидкие электроизоляционные материалы

### 2.2.1 Минеральные масла

Минеральные (нефтяные) электроизоляционные масла являются наиболее распространенными жидкими электроизоляционными материалами. Их применяют в силовых трансформаторах, высоковольтных вводах, кабелях, конденсаторах, измерительных трансформаторах и выключателях.

Минеральные масла представляют собой сложную смесь углеводородов, полученную путем очистки остаточных фракций нефти от смол, твердых углеводородов и различных серо- и азотосодержащих соединений.

Цвет товарного минерального масла обычно соломенно-желтый и характеризует глубину его очистки: чем глубже очистка, тем

светлее масло. Плохо очищенное масло из-за наличия в нем смолистых соединений имеет более темный цвет.

Наличие в масле твердых микрочастиц резко снижает его электрическую прочность, а также срок службы электрооборудования. В состоянии поставки технически чистое масло содержит в одном кубическом сантиметре  $10^4$ – $10^5$  микрочастиц размером до 100 мкм. Содержание микрочастиц в масле измеряют при получении от поставщика и перед заливкой в электрооборудование. Для удаления микрочастиц используют молекулярные сита и фильтры.

В процессе эксплуатации масло подвергается так называемому старению.

Старение – это процесс ухудшения основных электрических и физических характеристик масла с течением времени.

Старению масла в эксплуатации способствуют: высокие напряженности электрического поля, тепловые нагрузки, наличие в масле воды и кислорода, частичные и другие виды разрядов. Масло необходимо защищать от воздействия влаги и кислорода. При старении масла происходит его окисление, появление в нем сложных органических кислот. Для оценки старения масла часто используется такой показатель, как кислотное число. Кислотное число – это количество едкого калия (KOH) в миллиграммах, необходимое для нейтрализации всех кислот в грамме масла. Пример обозначения кислотного числа: KOH-0,2. При превышении значений кислотного числа 0,15–0,25 масло считается недопустимо окисленным. Для продления срока службы электроизоляционных масел, помимо применения присадок, замедляющих старение, стараются применять герметизацию оборудования, обеспечивающую защиту от непосредственного контакта с воздухом и его влагой.

В электроустановках с недостаточной степенью герметизации масло необходимо время от времени очищать и сушить. При сушке масло подогревают до температуры кипения воды и распыляют в вакууме. От твердых продуктов старения масло можно очистить с помощью центрифуги, в которой твердые частицы, как более плотные, отбрасываются к ее стенкам и удаляются.

Масла, залитые в электрооборудование, допускается эксплуатировать до тех пор, пока их показатели не превысят значений, указанных в соответствующей технической документации. При этом требуется периодический контроль за состоянием таких параметров, как  $Unp$ ,  $tg\delta$ , кислотное число, влагосодержание, прозрачность, содержание в масле газов и т. д.

По назначению минеральные масла делят на трансформаторные, конденсаторные, кабельные, масло для выключателей.

*Трансформаторные.* Их маркировка начинается с буквы Т (например, ТКп, ТСП, Т-750, Т-1500...). Марки отличаются друг от друга способом получения, методом очистки и месторождением нефти. Трансформаторное масло кроме электроизоляционных функций выполняет роль охлаждающей среды, циркулируя в баке трансформатора и охлаждая его обмотки и магнитопровод. Коэффициент теплопроводности масла позволяет ему отводить тепло в 25–30 раз эффективней, чем воздух. Это же масло используется в высоковольтных вводах трансформаторов.

*Конденсаторные масла.* Они служат для пропитки бумажной изоляции конденсаторов. По сравнению с другими маслами они отличаются более глубокой очисткой и меньшими значениями  $tg\delta$ . Конденсаторное масло не маркируется, так как оно не подлежит замене, а работает до конца срока службы в герметично закрытых конденсаторах.

*Кабельные масла.* Они используются в силовых электрических кабелях для пропитки бумажной изоляции. Это увеличивает ее электрическую прочность и способствует отводу тепла от жил кабеля. Для пропитки изоляции кабелей на напряжения до 35 кВ в свинцовых или алюминиевых оболочках служит масло высокой вязкости КМ-25, в которое добавляется синтетический загуститель октол или природный загуститель канифоль. Высокая вязкость в этих кабелях нужна для того, чтобы масло не вытекало по концам кабеля.

Для маслonaполненных кабелей на напряжение 110–220 кВ, в которых при эксплуатации поддерживается избыточное давление 0,3–0,4 МПа, применяют менее вязкое масло МН-4. В маслonaполненных кабелях на напряжения 110–500 кВ при давлении 1,5 МПа применяют масла С-110 и С-220.

*Масло для выключателей.* В масляных выключателях применяется масло марки МВ, имеющее малую вязкость, для того, чтобы масло быстро проникало в пространство между расходящимися контактами выключателя. Помимо этого оно должно иметь высокие электроизоляционные свойства.

Основные характеристики минеральных масел находятся в пределах:

$\rho = 10^{12} - 10^{14}$  Ом·м;  $\varepsilon = 2,1 - 2,4$ ;  $tg\delta = 0,002 - 0,005$ ;  $E_{np} = 180 - 200$  кВ/см; температура застывания  $t_{заст} = -45$  °С;  $t_{макс раб} = +95$  °С.



Основными недостатками минеральных масел являются:

- склонность к электрическому старению;
- пожароопасность и взрывоопасность маслонаполненного оборудования.

### 2.2.2 Хлорированные углеводороды

Хлорированные углеводороды, или полихлордифенилы (ПХД), получают из различных углеводородов, замещая часть атомов водорода атомами хлора. ПХД стабильны к окислению, пожаробезопасны и имеют относительно невысокую стоимость.

Типичным представителем хлорированных углеводородов является пентахлордифенил  $C_{12}H_5Cl_5$ , называемый соволом. Поскольку молекулы совола полярны, его диэлектрическая проницаемость достигает 5,2, что практически совпадает с диэлектрической проницаемостью изоляционных бумаг. Потому замена минеральных масел на совол при пропитке бумаги конденсаторов уменьшает объем конденсаторов почти в два раза.

Основным достоинством совола является его негорючесть, а недостатками – высокая температура застывания  $+5\text{ }^\circ\text{C}$ , большая вязкость (почти в десять раз выше, чем у минерального масла) и высокая токсичность.

С целью снижения вязкости совола в него добавляют разбавитель – негорючий трихлорбензол  $C_6H_3Cl_3$ . Смесь 64 % совола и 36 % трихлорбензола получила название совтол-2, а смесь 90 % совола и 10 % трихлорбензола – совтол-10.

Совтолы предназначены для пропитки бумажной изоляции и для работы в трансформаторах, так как они имеют достаточно низкую вязкость.

Основные характеристики хлорированных углеводородов находятся в пределах:

$\rho = 10^{12} - 10^{14}$  Ом·м;  $\varepsilon = 2,6 - 5,2$ ;  $tg\delta = 0,0003 - 0,008$ ;  $E_{np} = 180 - 200$  кВ/см;  $t_{max\text{ раб}} = +110\text{ }^\circ\text{C}$ .

Из-за токсичности ПХД их применение сначала ограничивалось, а в настоящее время новое оборудование с хлорированными углеводородами не выпускается. Однако в эксплуатации еще имеется значительное количество электрооборудования с ПХД (шахтная энергетика, нефте- и газоперекачивающие станции).

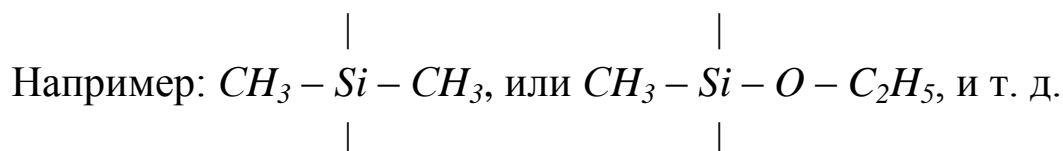
Предельно допустимая концентрация ПХД в воздухе рабочей зоны оборудования составляет  $1 \text{ мГ/м}^3$ , что соответствует классу высокотоксичных веществ. Утилизация трансформаторов и конденсаторов с ПХД жидкостями, отработавшими свой срок, производится по специальной нормативно-технической документации. Во многих странах полихлордифенилы запрещены к применению законом (в Японии и США с 1979 г.).

### 2.2.3 Кремнийорганические жидкости

Кремнийорганические, или иначе полиорганосилоксановые жидкости (ПОСЖ), имеют постоянно расширяющуюся область применения, связанную с запрещением и ограничением использования ПХД.

Имеющийся более чем тридцатилетний опыт применения кремнийорганических жидкостей подтверждает их высокое качество, термоокислительную стабильность и эксплуатационную надежность.

Кремнийорганические жидкости представляют собой полимерные жидкости, состоящие из различных соединений кремния, окиси кремния и органических групп (радикалов).



Кремнийорганические жидкости пожаробезопасны, не токсичны и обладают очень высокой нагревостойкостью. Максимальная рабочая температура до  $+250 \text{ }^\circ\text{C}$ . В качестве недостатка можно отметить высокую стоимость жидкостей (примерно в пять раз дороже минерального масла).

Примеры обозначения ПОСЖ: ПЭС – полиэтилсилоксановая, ПМС – полиметилсилоксановая и т. д.

Основные характеристики кремнийорганических жидкостей находятся в пределах:

$\rho = 10^{10} - 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon = 2,4 - 5,8$ ;  $\text{tg}\delta = 0,0002 - 0,002$ ;  $E_{np} = 140 - 200 \text{ кВ/см}$ ;  
температура застывания  $t_{заст} = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{макс раб} = +250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2.2.4 Синтетические углеводороды

Синтетические углеводороды (полибутены) обычно получают путем полимеризации углеводорода, имеющего состав  $C_4H_8$  (изобутилена). Этот газ является побочным продуктом при производстве синтетического каучука.

Полибутены – экологически безопасные, нетоксичные, биоразлагаемые и пожаробезопасные жидкости с широким диапазоном плотности и вязкости. Они обладают малыми диэлектрическими потерями, высокой стабильностью в электрическом поле и достаточно высокой нагревостойкостью ( $t_{\text{макс раб}} = +130\text{ }^\circ\text{C}$ ).

В России выпускается две марки полибутенов: октол, применяемый как загуститель в кабельной пропитке, и политбутен СК.

При пропитке полибутеном бумаги в силовых конденсаторах их срок службы возрастает примерно в два раза по сравнению с маслonaполненными конденсаторами.

Из-за высокой стоимости электрооборудования с синтетическими углеводородами их применение ограничивается местами, в которых необходимо обеспечить высокую пожаробезопасность (шахтная и корабельная энергетика, нефте- и газоперекачивающие станции).

Основные характеристики синтетических углеводородных жидкостей:  $\rho = 10^{12} - 10^{14}$  Ом·м;  $\varepsilon = 2,1 - 2,3$ ;  $tg\delta = 0,00001 - 0,0001$ ;  $E_{\text{пр}}$  до 300 кВ/см; температура застывания  $t_{\text{заст}} = -40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{макс раб}} = +130\text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2.2.5 Жидкости, применяемые взамен трансформаторного масла

Использование пожаробезопасных жидкостей (хлорированных углеводородов, кремнийорганических, синтетических углеводородов) в силовых трансформаторах требует изменений конструкции и размеров изоляции маслonaполненных трансформаторов. Это объясняется отличием характеристик этих жидкостей от соответствующих характеристик трансформаторного масла.

В последнее время в России разработаны и прошли испытания негорючие жидкости, которые можно применять в обычных трансформаторах взамен трансформаторного масла.

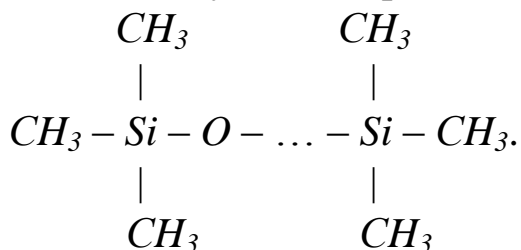
1. Пентаэритрит (ПЭТ). Жидкость, получаемая из эфиров пентаэритрита и синтетических жирных кислот. Пожаробезопасная и

нетоксичная жидкость, прошедшая испытания в силовых трансформаторах ТМ(Н)-160/6. Дороже трансформаторного масла всего в 2–2,5 раза.

Основные характеристики жидкости ПЭТ:

$\rho = 10^{13}$  Ом·м;  $\varepsilon = 2,8$ ;  $tg\delta = 0,02$ ;  $E_{np} = 200$  кВ/см; температура застывания  $t_{заст} = -60$  °С;  $t_{макс раб} = +200$  °С.

2. Софэксил. Силиконовая (кремнийорганическая) полимерная жидкость, имеющая следующее строение молекул:



Кристалльно прозрачная, нетоксичная жидкость, совместимая с материалами, используемыми в маслonaполненном оборудовании. Допускает заливку в бак трансформатора после слива из него масла.

Основные характеристики жидкости софэксил:

$\rho = 10^{13}$  Ом·м;  $\varepsilon = 2,71$ ;  $tg\delta = 0,0001$ ;  $E_{np} = 200$  кВ/см; температура застывания  $t_{заст} = -75$  °С;  $t_{макс раб} = +220$  °С.

## Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества и недостатки минеральных масел.
2. В каких видах электрооборудования применяются минеральные масла?
3. Какие жидкие диэлектрики, кроме минеральных масел, применяются в электроэнергетике? Назовите их преимущества и недостатки?

## 2.3 Твердые электроизоляционные материалы

### 2.3.1 Волокнистые материалы. Слоистый пластик

*Древесина.* В качестве электроизоляционных материалов используется древесина лиственных пород, обладающая большей плотностью по сравнению с хвойными. Основное преимущество древесины как изоляции – низкая стоимость. Она обладает целым рядом не-

достатков: низкой нагревостойкостью ( $t_{\text{макс раб}} = +105 \text{ }^\circ\text{C}$ ), горючестью, невысокой механической прочностью, склонностью к гниению, высокой гигроскопичностью и нестандартностью свойств. Так, электрическая прочность вдоль и поперек волокон древесины может отличаться в 3–4 раза.

Перечисленные недостатки ограничивают применение древесины в качестве электроизоляционных материалов. Основное применение: опоры воздушных линий электропередачи 0,4–110 кВ, изолирующие оперативные штанги и штанги для наложения заземления, клинья в электрических машинах.

Следует отметить, что при качественной пропитке опор воздушных линий антисептиком срок службы может быть достаточно высоким. Например, в Англии опоры линий эксплуатируются более 70 лет.

*Бумага и картон.* Получают путем химической переработки древесины в целлюлозу с дальнейшей прессовкой. Отличие электротехнической бумаги заключается в дополнительной варке в щелочных растворах. Это необходимо с целью устранения из бумаги лигнина, смолистого вещества, ускоряющего процессы старения.

В качестве электроизоляционных материалов используются следующие виды бумаги и картона.

1. Кабельная бумага. Предназначена для создания изоляции кабелей высокого напряжения. Выпускается в виде лент толщиной 80–170 мкм, которые после намотки на жилы кабеля пропитываются кабельным маслом. Электрическая прочность непропитанной бумаги невелика, всего 60–90 кВ/см, так как в ней находятся влага и воздух. После пропитки электрическая прочность кабельной бумаги возрастает примерно в 10 раз и  $E_{np}$  достигает значений 700–800 кВ/см.

Для уменьшения радиальных размеров кабеля в бумажно-масляной изоляции используется принцип градирования. Поскольку напряженность поля в диэлектриках распределяется обратно пропорционально относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$ , то для благоприятного распределения напряженности слои бумаги с большими значениями  $\epsilon_r$  помещают ближе к токоведущей жиле кабеля (см. рис. 2.7). При этом должно выполняться условие:  $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2} > \epsilon_{r3}$ . Большим значениям  $\epsilon_r$  соответствует более тонкая и плотная бумага.

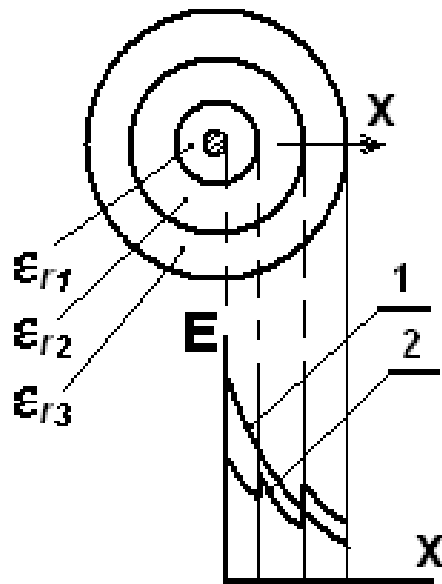


Рис. 2.7. Изменение напряженности электрического поля  $E$  по толщине кабельной изоляции: 1 – без градирования; 2 – с градированием

Примеры обозначения кабельной бумаги: К-120 (К – кабельная, 120 – толщина в мкм), КМ – кабельная многослойная (3–4 слоя), КВ – кабельная высоковольтная, КВМ – кабельная высоковольтная многослойная, КВМУ – кабельная высоковольтная многослойная уплотненная.

2. Трансформаторная бумага. Используется в продольной (витковой) изоляции обмоток трансформаторов. Выпускается в виде лент толщиной 80–120 мкм. После пропитки маслом электрическая прочность может достигать 1 200 кВ/см.

3. Конденсаторная бумага. Используется наиболее чистая и тонкая бумага с толщиной лент 4–30 мкм. Является одним из наиболее качественных видов высоковольтной изоляции. Пробивная напряженность после пропитки кабельным маслом может достигать 2 500–3 000 кВ/см. Эта изоляция применяется не только в силовых конденсаторах, но и в других электроустановках, когда требуется уменьшение радиальных размеров изоляции. Например, промышленность выпускает высоковольтные трансформаторные вводы на классы напряжения 220–1 150 кВ с изоляцией конденсаторного типа.

Примеры обозначения конденсаторной бумаги: КОН – конденсаторная, СКОН – специальная с повышенной плотностью, МКОН – бумага с малым  $\operatorname{tg}\delta$ , ЭМКОН – с повышенной электрической прочностью.

4. Пропиточная бумага. Используется в качестве наполнителя при изготовлении слоистого пластика гетинакса. Для лучшей пропитки смолами бумага изготавливается с малой плотностью. Обозначается ЭИП – бумага электроизоляционная пропиточная.

5. Намоточная. Предназначена для изготовления различных изоляционных труб и цилиндров. При ее намотке поверхность бумаги смазывается тонким слоем бакелитовой смолы. Из нее изготавливают различные изолирующие штанги, указатели напряжения, бумажно-бакелитовые высоковольтные вводы трансформаторов до 110 кВ.

6. Микалентная. Используется как подложка при изготовлении гибкой слюдяной ленты (микаленты). Для увеличения ее прочности в целлюлозу добавляют хлопковое волокно. Микалента используется в качестве дополнительной изоляции в электрических машинах.

7. Картон. Изготавливают толщиной 0,1–6,0 мм. Для повышения механической прочности в него добавляют хлопковое волокно. Картон делится на воздушный и масляный. Воздушный картон обладает невысокой электрической прочностью, всего 80–130 кВ/см. Электрическая прочность масляного достигает 380–600 кВ/см. Электрокартон используют в качестве дополнительной высоковольтной изоляции в силовых конденсаторах и трансформаторах.

*Фибра.* Изготавливается из смеси хлопкового волокна и древесной целлюлозы, пропитанных хлористым цинком. После прессовки и сушки получают электротехнический материал с невысокими электрическими характеристиками:  $\rho = 10^7$  Ом·м;  $\varepsilon = 3,0$ ;  $E_{пр} = 35–50$  кВ/см. Кроме того, фибра обладает высокой гигроскопичностью, поэтому в качестве высоковольтной изоляции не применяется. Отличительной особенностью этого материала являются его дугогасительные свойства. При воздействии высокой температуры дуги фибра выделяет большое количество газов. Благодаря этому свойству фибра применяется в дугогасительных камерах автоматов питания, рубильниках и трубчатых разрядниках.

*Слоистый пластик.* В слоистых пластмассах чередуются слои листового наполнителя (бумага, хлопчатобумажная ткань, стеклоткань) и связующее вещество.

1. Гетинакс. Листовой слоистый материал, состоящий из бумаги, пропитанной бакелитовыми смолами и спрессованный между двумя металлическими листами при температуре +160 °С гидравлическим прессом. Время прессовки обычно составляет 2–5 минут. Расплавленная смола при высокой температуре отвердевает и

получается недорогой слоистый пластик, имеющий невысокие механические характеристики.

2. Текстолит. Технология изготовления текстолита аналогична технологии создания гетинакса, но в качестве наполнителя используется хлопчатобумажная ткань. Текстолит дороже, но имеет более высокую механическую прочность и хорошо обрабатывается. Из него можно изготавливать изоляционный крепеж (болты, гайки, шайбы).

3. Стеклотекстолит. Технология изготовления аналогична двум предыдущим материалам, но в качестве наполнителя используется стеклоткань. В результате получается материал с очень высокой механической прочностью, с повышенной нагревостойкостью и влагостойкостью, но более дорогой по сравнению с текстолитом.

4. Гетинакс лавсановый. Новый материал на основе синтетической лавсановой бумаги и эпоксидной смолы. Штампуется без подогрева. Лавсановый гетинакс имеет повышенную влагостойкость и хорошие механические свойства.

Слоистые пластмассы имеют примерно одинаковые электрические характеристики:  $\rho = 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon \approx 7,0$ ;  $\text{tg}\delta = 0,04\text{--}0,08$ ;  $E_{пр} \approx 100\text{--}200 \text{ кВ/см}$ . Они обычно применяются в качестве низковольтной изоляции, а в высоковольтных установках – как дополнительная изоляция (барьеры в трансформаторах, дугогасительные камеры выключателей и т. д.).

### 2.3.2 Электрокерамика. Стекло. Материалы на основе слюды

*Электрокерамика.* Изготавливается из смеси различных порошкообразных материалов и глины путем обжига. Электрокерамика негигроскопична, обладает высокой нагревостойкостью и радиационной стойкостью, не подвержена старению, атмосферостойка.

*Электрофарфор.* Исходная масса при изготовлении электротехнического фарфора состоит на 50 % из глинистых веществ, 25 % – полевого шпата и 25 % – кварцевого песка. После добавления воды производится формовка изделия, сушка и глазуровка (покрытие жидкой глазурью). Далее изделие из фарфора обжигают в течение примерно 32 часов с плавным подъемом температуры до 1 400 °С и плавным ее понижением. Глазурь при высокой температуре создает на поверхности фарфора стекловидное покрытие, повышающее



механическую прочность и устраняющее пористость поверхности. Электрофарфор хорошо выдерживает механические нагрузки, направленные на сжатие. Предел прочности на сжатие у электрофарфора достигает  $1\ 400\ \text{кГ/см}^2$ . Однако предел прочности на растяжение у него невелик. Максимальное разрывное усилие у фарфоровых изоляторов достигает лишь 4–5 тонн.

Поэтому в подвесных тарельчатых изоляторах фарфор используется лишь на линиях классов напряжения до 220 кВ включительно. Основная область применения электрофарфора – опорные изоляционные конструкции и подстанционная изоляция.

Основные электрические характеристики электрофарфора:

$$\rho = 10^{11} - 10^{12}\ \text{Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon = 6 - 7; \text{tg}\delta = 0,025 - 0,03; E_{np} = 300 - 320\ \text{кВ/см}.$$

*Стеатит.* Имеет следующий состав: 20 % глинистых веществ, остальное – углекислый кальций, углекислый барий и тальк. Материал более дорогой, но имеет повышенные характеристики по сравнению с электрофарфором:

$$\rho = 10^{13} - 10^{14}\ \text{Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon = 7 - 8; \text{tg}\delta = 0,0006 - 0,004; E_{np} = 350 - 400\ \text{кВ/см}.$$

Применяется для изготовления высоковольтных вводов трансформаторов и наиболее ответственных видов подстанционной изоляции.

*Кордиеритовая керамика.* Отличается от электрофарфора добавлением соединений  $\text{MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Обладает исключительной нагревостойкостью (до  $2\ 000\ ^\circ\text{C}$ ), выдерживает воздействие силовой электрической дуги. Из нее изготавливают дугогасительные камеры вентильных разрядников.

*Стекло.* Силикатное (неорганическое) стекло представляет собой дешевый материал, так как изготавливается из доступных веществ. В его состав входят кварцевый песок ( $\text{SiO}_2$ ), сода ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), мел и доломит. Смесь этих веществ нагревают до температуры варки стекла  $1\ 350 - 1\ 600\ ^\circ\text{C}$ , а затем производят формовку изделий. После изготовления стеклянных изоляторов производится их закалка. При этом изоляторы нагревают в струях горячего воздуха с температурой  $+700\ ^\circ\text{C}$  до размягчения поверхностного слоя, а затем быстро охлаждают холодным воздухом. Застывая, наружные слои сильно сдавливают внутреннюю часть стекла. Если растягивать такой изолятор, то для его разрыва необходимо сначала преодолеть внутренние механические усилия, созданные закалкой. С помощью закалки у стекла удается получить предел прочности на растяжение

1 300–1 400 кГ/см<sup>2</sup>, а разрывное усилие готовых стеклянных изоляторов – 30 тонн.

Силикатное стекло принято делить:

– на щелочное, содержащее большое количество окислов щелочных металлов Na<sub>2</sub>O, Ca<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, используемое в качестве бытовых стекол;

– щелочное с большим содержанием окислов тяжелых металлов, например PbO, применяемое для создания оптики;

– малощелочное с содержанием окислов щелочных металлов не более 5 % и используемое в подвесных стеклянных изоляторах высокого напряжения;

– бесщелочное с содержанием окислов щелочных металлов не более 2 %.

Последнее используется для получения стекловолокна. При склеивании стекловолокна эпоксидными смолами получают высокопрочный стеклопластик, используемый в качестве основы для полимерных подвесных и опорных изоляторов. Стержень из однонаправленного стекловолокна, склеенного смолами, и имеющий диаметр 1 см, может выдерживать усилие на растяжение 1,5 тонны.

Малощелочное стекло, применяемое в изоляторах высокого напряжения, имеет следующие электрические характеристики:

$$\rho = 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \varepsilon = 3,0\text{--}6,0; \text{tg}\delta \approx 0,02\text{--}0,025; E_{np} = 400\text{--}450 \text{ кВ/см.}$$

*Материалы на основе слюды.* Слюда – природный слоистый материал с толщиной отдельных листочков до 0,006 мм, обладающий гибкостью и высокой механической прочностью на растяжение. Кроме того, слюда отличается высокой нагревостойкостью. Ее максимальная рабочая температура может быть от 200 до 900 °С, в зависимости от месторождения слюды.

Склеивая отдельные листочки слюды смолами или лаками, получают следующие высококачественные материалы.

*Миканит.* Широко используется в изоляции электрических машин (мощных генераторов и двигателей) в качестве основной пазовой изоляции.

*Микалента.* Листочки слюды, наклеенные на специальную (микалентную) бумагу. Применяется там же в качестве намоточного материала.

*Микалекс.* Молотые слюда и стекло, спрессованные при высокой температуре. Применяется в дугогасительных камерах выключателей.

Поскольку материалы на основе слюды достаточно дорогие, их используют в наиболее ответственных и дорогостоящих электроустановках.

Основные электрические характеристики материалов на основе слюды:

$$\rho = 10^{12} - 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon = 6 - 8; \text{tg}\delta = 0,0003 - 0,0005; E_{np} = 1\ 200 - 1\ 900 \text{ кВ/см.}$$

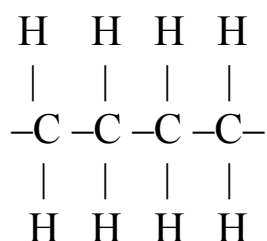
### 2.3.3 Высокополимерные материалы

Полимеры – это вещества с большой молекулярной массой, получаемые из более простых исходных молекул (мономеров), в результате реакции полимеризации, приводящей к химической связи мономеров.

Если молекулы имеют линейную структуру, то есть, момеры соединяются в цепочку (–А–А–А–А–), полимеры называются линейными. Если молекулы имеют разветвленную структуру – пространственными.

Высокополимерные вещества бывают и природного происхождения, например, янтарь и каучук.

*Полиэтилен.* Линейный полимер, имеющий строение молекул и получаемый в результате полимеризации газа этилена  $\text{C}_2\text{H}_4$ .



Полиэтилен – термопластичный материал, обладающий водоотталкивающими свойствами и стойкостью к растворителям. Основные недостатки полиэтилена – низкие нагревостойкость (+70 °С) и светостойкость (разрушение под действием ультрафиолетовых лучей).

Для повышения нагревостойкости полиэтилен сшивают (вулканизируют). Сшивка заключается в добавлении в полиэтилен специальных добавок при воздействии на него ионизирующих излучений. При этом происходит пространственное соединение линейных молекул между собой, или, иначе, сшивка молекул. Сшитый полиэтилен обладает гораздо большей нагревостойкостью,  $t_{\text{макс раб}} = +90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Основные электрические характеристики полиэтилена:

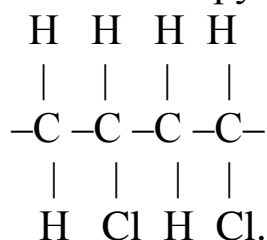
$$\rho = 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon = 2,3; \text{tg}\delta = 0,003; E_{np} = 500 \text{ кВ/см.}$$

В настоящее время промышленность практически прекратила выпуск кабеля с вязкой пропиткой и перешла на производство кабеля с полимерной изоляцией. В кабеле большой мощности и высокого класса напряжения применяют изоляцию из сшитого полиэтилена.

Самый мощный в мире кабель, проложенный недалеко от Лондона, мощностью 1 500 Мвт, длиной 20 км, с  $U_{ном} = 400$  кВ и сечением жил 2 500 мм<sup>2</sup>, имеет изоляцию из сшитого полиэтилена. Самый длинный кабель проложен в Южной Австралии и имеет длину 180 км, мощность 200 Мвт,  $U_{ном} = 150$  кВ и сечение жил 1 200 мм<sup>2</sup>. Он также имеет изоляцию из сшитого полиэтилена.

В нашей стране освоен выпуск кабеля из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 110, 220 и 500 кВ. Кабель 500 кВ уже эксплуатируется на Бурейской ГЭС.

*Полихлорвинил.* Полихлорвинил (ПХВ), или поливинилхлорид, – твердый белый материал с линейной структурой молекул:



ПХВ без добавления пластификаторов называют *винипласт*. Винипласт имеет очень высокую механическую прочность, стойкость к ударным нагрузкам, он также обладает высокими химической стойкостью и влагостойкостью. Он является хорошим газогенерирующим материалом.

Основной недостаток винипласта (ПХВ) – низкая нагревостойкость. При температурах выше 140 °С он разлагается с выделением токсичных газов.

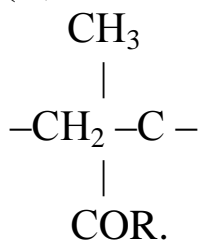
Основные электрические характеристики винипласта:

$$\rho = 10^{12} - 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon = 4; \text{tg}\delta = 0,01 - 0,02; E_{np} = 200 \text{ кВ/см.}$$

Максимальная рабочая температура составляет  $t_{\text{макс раб}} = +105$  °С.

Полихлорвинил применяется в изоляции проводов, используется в качестве оболочек силового кабеля. Из него изготавливают изоляционные трубки и изоленту. Твердый винипласт используется в трубчатых разрядниках в качестве газогенерирующего материала. Трубчатые разрядники с винипластовой трубкой изготавливают на классы напряжения 6–110 кВ.

*Органическое стекло.* Оргстекло, или полиметилметакрилат, является продуктом полимеризации молекул, состоящих из  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$  и эфиров акриловой кислоты (R)



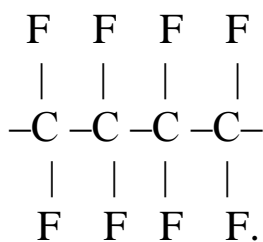
Обладает высокими химической стойкостью и влагостойкостью и дугогасящими свойствами.

Основные электрические характеристики оргстекла:

$$\rho = 10^{10} - 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon = 3,6; \text{tg}\delta = 0,06; E_{np} = 150 - 180 \text{ кВ/см.}$$

Из-за высокой стоимости довольно редко используется как электротехнический материал. Из оргстекла иногда изготавливают вводы образцовых конденсаторов и дугогасительные камеры рубильников.

*Фторопласт.* Это негорючий, жирный на ощупь материал белого цвета, обладающий необычайно высокой для полимеров нагревостойкостью ( $t_{\text{макс раб}} = +250 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Исключительно химически стоек, на него не действуют практически никакие кислоты и щелочи, негигроскопичен и не смачивается водой. Холодостойкость – до  $-269 \text{ }^\circ\text{C}$ . По электрическим свойствам его тоже можно отнести к лучшим электроизоляционным материалам. Фторопласт является линейным полимером



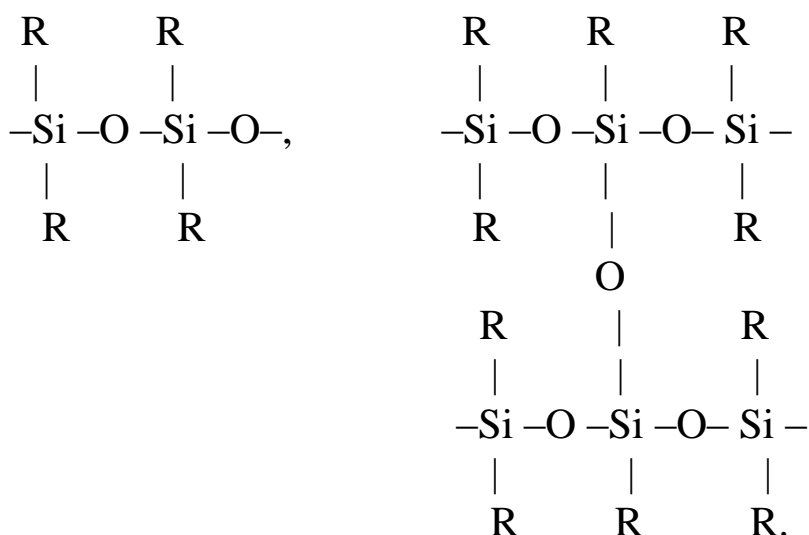
Основные электрические характеристики фторопласта:

$\rho = 10^{15} - 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon = 1,9 - 2,2; \text{tg}\delta = 10^{-4}; E_{np}$  для тонких пленок – до  $1\ 800 \text{ кВ/см}$ .

Основной недостаток фторопласта – высокая стоимость. Поэтому его используют как изоляцию только в наиболее ответственных электротехнических устройствах (электроустановки самолетов, космических кораблей и т. д.).

*Кремнийорганические полимеры.* Кремнийорганические полимеры, или полиорганосилоксаны, находят все большее применение в электроэнергетике. В их состав кроме органических соединений входит кремний (Si), являющийся важнейшей составной частью многих неорганических материалов, таких как слюда, стекло, электрокерамика.

Полиорганосилоксаны могут быть линейные и пространственные:



R – представляют собой различные органические радикалы, CH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub> и т. д. В зависимости от вида радикалов получают либо каучукоподобные, либо твердые материалы. Рабочая температура кремнийорганики:  $t_{\text{макс раб}} = +180 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{мин раб}} = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Кроме высокой нагревостойкости эти материалы обладают химической стойкостью и водоотталкивающими свойствами.

Основные электрические характеристики кремнийорганических полимеров:

$$\rho = 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon = 3; \text{tg}\delta = 0,0003\text{--}0,005; E_{\text{пр}} = 800\text{--}1\ 200 \text{ кВ/см}.$$

В настоящее время происходит широкое внедрение высоковольтных полимерных изоляторов: подвесных, опорных и проходных, на все классы номинального напряжения. Промышленность серийно выпускает полимерные стержневые изоляторы серии ЛК на напряжение 6–1 150 кВ. Основу изолятора составляют стеклопластиковый стержень, обеспечивающий необходимую прочность на растяжение, и кремнийорганическая (силиконовая) рубашка с ребрами для получения нужных разрядных характеристик по поверхности изолятора (см. рис. 2.8).



*Рис. 2.8. Внешний вид нелинейных ограничителей перенапряжения с полимерными крышками*

Кроме того, кремнийорганическими рубашками оснащаются опорные изоляторы и нелинейные ограничители перенапряжений ОПН (рис. 2.9).



*Рис. 2.9. Конструкция полимерного изолятора серии ЛК*

### **2.3.4 Лаки, смолы, компаунды**

Электроизоляционные лаки и компаунды – это материалы, которые в процессе изготовления изоляции находятся в жидком виде, а в готовой изоляции – в твердом состоянии. Это так называемые твердеющие материалы.

*Лаки* – представляют собой коллоидные растворы различных смол, высыхающих масел и битумов в летучих растворителях. При сушке лака растворитель улетучивается и лаковая основа переходит в твердое состояние.

По применению электроизоляционные лаки делят на пропиточные, покрывные и клеящие.

Пропиточные лаки предназначены для пропитки бумаги, картона и ткани при создании изоляции электрических машин.

Покрывные – предназначены для создания прочной и влагостойкой пленки на поверхности изоляции.

Клеящие лаки применяются для склеивания различных твердых электроизоляционных материалов, таких как слюда, бумага, ткань.

Электроизоляционные лаки также делят:

– на смоляные, в которых растворителями являются различные спирты. Эти лаки обозначаются: БЛ – бакелитовые, ГФ – глифталиевые, ПЭ – полиэфироэпоксидные, КО – кремнийорганические;

– нитроцеллюлозные (растворы эфиров целлюлозы), обозначаются как НЦ;

– масляные (высыхающие масла), имеют обозначение МЛ;

– битумные (растворы битумов в органических растворителях), обозначаются БТ.

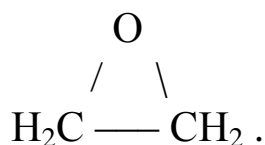
*Компаунды* отличаются от лаков отсутствием в них летучих растворителей. В качестве компаундов используют различные смолы и битумы.

Компаунды по назначению делят на пропиточные и заливочные. Пропиточные – применяются для создания слоистых пластиков (гетинаксов, текстолитов и т. д.). Заливочные – предназначены для заполнения больших полостей между различными деталями электрических машин и для заполнения кабельных муфт.

Наиболее известны термопластичные битумные компаунды. Для размягчения перед заливкой их разогревают.

В последнее время все чаще применяют терморезистивные эпоксидные компаунды. Они обладают большей нагревостойкостью и применяются для заливки деталей сухих трансформаторов и в качестве основной изоляции водостойких электрических машин и кабельных муфт.

Эпоксидные смолы – это синтетические смолы, продукт поликонденсации эпихлоргидрина с фенолами. Они имеют в своем составе так называемые эпоксидные группы (кольца):





## Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества и недостатки электротехнических бумаг.
2. В каких видах электрооборудования применяются электротехнические бумаги?
3. Назовите преимущества и недостатки стекла и фарфора, сравните эти материалы между собой и объясните область применения.
4. Каковы особенности материалов на основе слюды, где их применяют?
5. В каких электроустановках применяются высокополимерные твердые электроизоляционные материалы?
6. Сравните между собой характеристики полиэтилена, фторопласта и кремнийорганических полимеров.

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ К МОДУЛЮ 2

### Контрольное задание № 2

Твердый диэлектрик с объемным удельным сопротивлением  $\rho_v$  и удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_s$  имеет форму и размеры, указанные в таблице 2.1 и на рисунке 2.10. Он установлен между электродами, на которых поддерживается постоянное напряжение  $U$ . Определить ток, протекающий через диэлектрик, и потери мощности в нем.

Ток, протекающий через объем, определяется –  $I_v = U/R_v$ .

Ток, протекающий по поверхности диэлектрика –  $I_s = U/R_s$ .

Суммарный ток утечки –  $I = I_v + I_s$ .

Потери мощности в диэлектрике –  $P = I \cdot U$ .

Удельное объемное сопротивление –  $\rho_v = R_v \cdot S/h$ .

Удельное поверхностное сопротивление –  $\rho_s = R_s \cdot d/l$ .

$d$  – периметр,  $l = h$ .

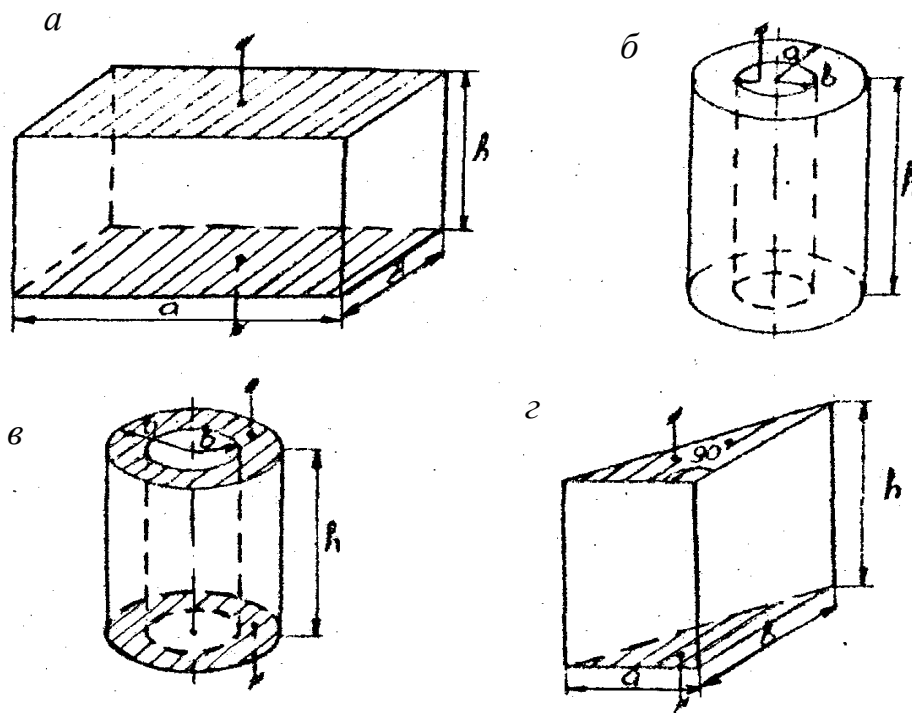


Рис. 2.10. Формы диэлектриков:

*а, в, г – электродами являются нижняя и верхняя поверхности фигур;  
б – электродами являются внутренняя и внешняя поверхности цилиндра*

Выбор варианта контрольного задания осуществляется по таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Варианты заданий

Номер варианта	Форма	$a$ , мм	$b$ , мм	$h$ , мм	$\rho_v$ , Ом·м	$\rho_s$ , Ом	$U$ , кВ
1	а	20	20	20	$1 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^8$	2,0
2	б	25	15	80	$1 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{12}$	0,8
3	в	15	0	25	$1 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^9$	1,5
4	г	10	20	35	$1 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{11}$	3,0
5	а	30	15	125	$1 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$	5,0
6	б	20	5	30	$1 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	4,0
7	в	35	20	115	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{11}$	2,5
8	г	15	25	50	$2 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^9$	3,5
9	а	5	30	35	$1 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{10}$	0,5
10	б	25	5	40	$3 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{10}$	4,5
11	в	15	10	20	$1 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	5,0
12	г	25	15	80	$1 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{11}$	4,0

Окончание табл. 2.1

Номер варианта	Форма	$a$ , мм	$b$ , мм	$h$ , мм	$\rho_v$ , Ом·м	$\rho_s$ , Ом	$U$ , кВ
13	А	30	5	35	$1 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{14}$	2,5
14	б	25	20	25	$1 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	2,0
15	в	30	15	125	$1 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{13}$	0,8
16	г	15	10	30	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{11}$	1,5
17	а	25	20	115	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^9$	3,0
18	б	15	5	120	$2 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{10}$	0,5
19	в	15	5	50	$1 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^8$	4,5
20	г	35	25	35	$3 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{12}$	5,0
21	а	25	10	20	$1 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^9$	0,5
22	б	10	5	50	$1 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{11}$	4,5
23	а	15	15	20	$1 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$	5,0
24	б	35	15	120	$1 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	4,0
25	а	20	10	115	$1 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{13}$	1,5

## МОДУЛЬ 3

### ПРОВОДНИКОВЫЕ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### Цели и задачи изучения модуля 3

В этом разделе рассматриваются физические основы проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов. Приводятся их основные характеристики и указывается область применения.

После изучения модуля 3 вы будете знать:

- основные характеристики проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов;
- особенности изготовления и применения проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов, используемых в электротехнике.

После изучения модуля 3 вы будете уметь:

- выбирать проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы в соответствии с областью их применения.

#### 3.1 Проводниковые материалы

##### 3.1.1 Проводниковые материалы высокой удельной проводимости

Проводниковые материалы по их электропроводности можно разделить на сверхпроводники, криопроводники, материалы высокой удельной проводимости и материалы высокого удельного сопротивления.

Способность материалов проводить электрический ток характеризуется удельным электрическим сопротивлением (Ом·м) или удельной электрической проводимостью (См/м):

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (3.1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (3.2)$$

где  $R$  – сопротивление образца сечением  $S$  и длиной  $l$  (рис. 3.1).

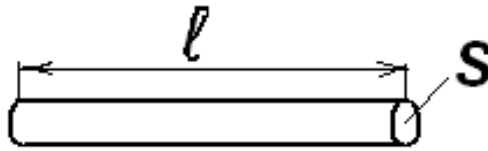


Рис. 3.1. Образец проводникового материала

Диапазон удельных сопротивлений проводниковых материалов находится в пределах от  $10^{-25}$  Ом·м для сверхпроводников, до  $1,5 \cdot 10^{-6}$  Ом·м – для хромалюминиевых сплавов.

Механизм протекания тока в металлах обусловлен движением свободных электронов – поэтому их называют материалами с электронной проводимостью. По классической электронной теории, металлы имеют ионную кристаллическую решетку, внутри которой находится «электронный газ», состоящий из свободных электронов. Электроны совершают хаотические тепловые движения, система в целом электрически нейтральна. Если на проводник действует электрическое поле, то электроны начинают двигаться и появляется электрический ток.

Электрическому току препятствуют положительные ионы кристаллической решетки и их колебания, амплитуда которых зависит от температуры. При встрече с препятствием электроны теряют часть кинетической энергии, и появляется сопротивление электрическому току. С ростом температуры возрастает амплитуда тепловых колебаний узлов кристаллической решетки, что в свою очередь приводит к росту удельного сопротивления (рис. 3.2).

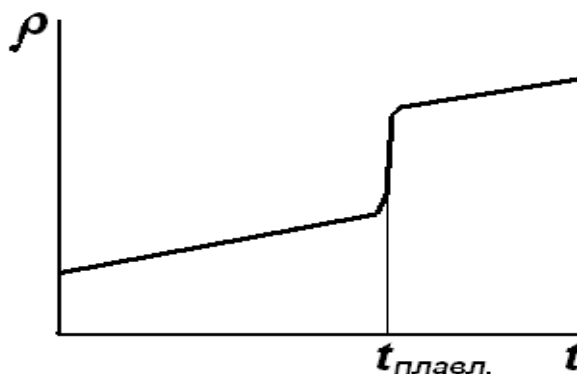


Рис. 3.2. Зависимость удельного сопротивления проводников от температуры

Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельных со-

противлений. Примеси искажают кристаллическую решетку, что приводит к увеличению удельного сопротивления.

Изменение удельного сопротивления от температуры характеризуют температурным коэффициентом в град<sup>-1</sup>:

$$TK\rho = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 \Delta t}, \quad (3.3)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление в начале диапазона изменения температуры;

$\rho_t$  – в конце диапазона;

$\Delta t$  – диапазон изменения температуры.

Значения  $TK\rho$  для чистых металлов составляют примерно 0,0004 град<sup>-1</sup>.

### 3.1.2 Сверхпроводниковые материалы

Сверхпроводимостью называется явление снижения удельного сопротивления некоторых материалов при низких, так называемых критических температурах ( $t_{кр}$ ), до не поддающихся измерению низких значений (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Температурные зависимости удельного сопротивления проводника и сверхпроводника

Это явление было открыто в 1911 году голландским физиком Оннесом Камерлингем для ртути при температурах, близких к абсолютному нулю.

Критическая температура ( $T_k$ ) для ртути составила 4,2 К. Сверхпроводящий алюминий имеет  $T_k = 1,2$  К. Такие металлы, как серебро, золото, платина, медь, не являются сверхпроводниками, по крайней мере, при температурах, выше 0,05 К.

В нормальном состоянии узлы кристаллической решетки металлов колеблются, при этом отклонение от положения равновесия достигает  $10^{-10}$  см, что лишь в 100 раз меньше расстояния между соседними узлами решетки. Обычные электроны, сталкиваясь с такими узлами, изменяют либо свое направление, либо скорость, т. е., в конечном счете, меняется их энергетический импульс

$$\vec{p}_i = m_0 \vec{v}_i, \quad (3.4)$$

где  $m_0$  – масса электрона;

$\vec{v}_i$  – вектор скорости  $i$ -го электрона.

В результате появляются потери энергии, которые и определяют сопротивление проводника  $R$ .

В сверхпроводящем состоянии кристаллическая решетка не искажена тепловыми колебаниями, поэтому условия взаимодействия электронов с решеткой будут следующими. Пусть первоначальные траектории двух электронов характеризуются импульсами  $\vec{p}_1$  и  $\vec{p}_2$ . Пролетая около узла решетки, один из электронов, взаимодействуя с ним, отдает часть своей энергии в виде импульса  $\vec{q}$  (рис. 3.4).

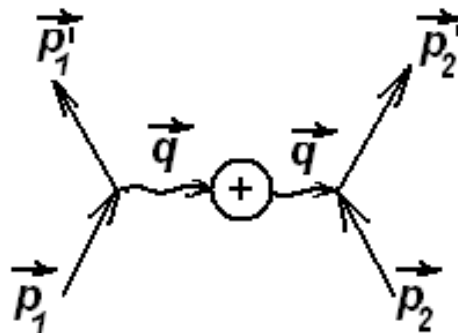


Рис. 3.4. Обмен энергии между электронами и узлами кристаллической решетки в сверхпроводнике

Решетка поглощает эту энергию (возбуждается), а далее отдает эту энергию второму электрону с импульсом  $\vec{p}_2$ . В результате такого взаимодействия сумма первоначальных и конечных импульсов не меняется, то есть

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2', \quad (3.5)$$

где  $\vec{p}_1'$  и  $\vec{p}_2'$  – импульсы электронов после взаимодействия с узлом решетки.

Поэтому сверхпроводящие электроны не испытывают сопротивления решетки. Они становятся взаимосвязанными.

Опытные данные показывают, что при критической температуре сопротивление уменьшается примерно на 13 порядков. Наиболее точные измерения проводились в сверхпроводящем алюминиевом кольце при  $T < T_k$ .

Измерения магнитного поля и расчеты затухания тока  $I_0$ , проведенные по формуле

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{Rt}{L}}, \quad (3.6)$$

где  $R$  – сопротивление кольца;

$L$  – индуктивность;

$t$  – время затухания тока показали, что  $\rho < 10^{-25}$  Ом·м. В то время, как у сверхчистого алюминия при  $T = 2$  К удельное сопротивление имеет значение  $\rho = 3 \cdot 10^{-12}$  Ом·м. Кроме того, было обнаружено, что явление сверхпроводимости исчезает при достижении током определенного значения.

Это явление обусловлено действием магнитного поля, которое создает ток в сверхпроводнике. Сверхпроводимость исчезает при некоторой критической напряженности магнитного поля  $H_{кр}$ , зависящей от температуры (рис. 3.5).

Критические параметры  $H_{кр}$  и  $T_{кр}$  зависят от структуры материала и степени его неоднородности.



Рис. 3.5. Зависимость критической напряженности магнитного поля сверхпроводника от температуры

До недавнего времени рекорсменом среди сверхпроводников было соединение  $Nb_3Ge$  с  $T_{кр} = 23,2$  К, полученное в 1973 г.



Возможные области использования сверхпроводников: передача электрической энергии, сверхпроводниковые электромагниты (со сверхмощными магнитными полями), накопители энергии, обмотки трансформаторов и электрических машин (с уменьшением массы генератора в 3–4 раза и повышением мощности). Основное препятствие широкого применения: очень низкие температуры и охлаждение с помощью дорогого жидкого гелия.

### 3.1.3 Высокотемпературная сверхпроводимость

В 1986 году в ученом мире произошла сенсация. Исследовательские группы Хьюстонского и Алабамского университетов обнаружили сверхпроводимость в керамиках из иттрия, бария, меди и кислорода с критической температурой  $T_{кр} = 93$  К. Формула вещества, уже выделенного в чистом виде,  $Y_1Ba_2Cu_3O_6$ . Такие материалы, с температурой перехода в сверхпроводящее состояние, соответствующее температуре жидкого азота (77 К), получили название высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

В настоящее время лучшие керамические ВТСП имеют критическую температуру  $T_{кр} = 110$  К. Их выпускают в виде тонких и гибких лент. Промышленные образцы электрооборудования с ВТСП все шире используются в электроэнергетике. Так, летом 2001 года на подстанции в Копенгагене введен в работу первый промышленный трехфазный сверхпроводящий кабель на  $U_{ном} = 30$  кВ с  $I_{ном} = 2$  кА. Охлаждение в нем производится жидким азотом при температуре минус 196 °С.

В США в сети 110 кВ штата Висконсин установлены сверхпроводящие индукционные накопители энергии. Они поддерживают напряжение у потребителей на уровне 90 % при перерыве питания 1 с.

В США также выпускают токоограничивающие устройства с ВТСП на  $U_{ном} = 15$  кВ. Они снижают ток короткого замыкания практически мгновенно, прежде чем разовьется повреждение оборудования.

Последние ВТСП материалы позволяют создавать кабели, конкурирующие с обычными кабелями из сшитого полиэтилена, начиная с мощности 500 МВт.

Плотность тока в них достигает 100 кА/см<sup>2</sup>. В Италии испытан промышленный образец ВТСП кабеля мощностью  $S = 1\,000$  МВА с  $U_{ном} = 225$  кВ, конкурирующий даже с воздушной линией, благодаря малым потерям электроэнергии.

Освоенные размеры кабелей ВТСП позволяют организовать токопроводы для энергоснабжения крупных заводов.

Японская фирма Tokyo Electric Power планирует создать ВТСП кабель для подвода мощности 1 ГВт в Токио и тем самым отказаться от рытья новых подземных туннелей.

Стоимость самого ВТСП материала составляет 90 % стоимости кабеля, однако в ближайшие годы ожидается ее снижение примерно в пять раз.

Широкие перспективы имеет применение ВТСП при создании силовых трансформаторов. Такие трансформаторы имеют нагрузочные потери меньше на 80–90 %, по сравнению с обычными. Кроме того, уменьшаются вес и габариты трансформатора. Так, трансформатор с обмоткой из ВТСП мощностью 100 МВА будет иметь массу около 60 тонн вместо 130 тонн у трансформатора традиционного исполнения. В этих трансформаторах обмотки помещают в цилиндрические криостаты. Двойные стенки криостатов изготовлены из оксида и между ними поддерживается вакуум. Такие трансформаторы мощностью до 10 МВА уже прошли испытания и выпускаются промышленностью США. Фирма «Сименс – Альстром» выпускает компактные тяговые трансформаторы для локомотивов железной дороги.

Ожидаемый объем производства электрооборудования с ВТСП в мире к 2010 году должен достичь 600 млн долларов.

В соответствии с «Концепцией технической политики ОАО РАО «ЕЭС» России на период до 2009 года (от 12.11.04), отмечается необходимость использования сверхпроводникового оборудования электросетевой направленности:

- сверхпроводниковых токоограничителей (СОТ), способствующих снижению запасов прочности всего электрооборудования по токам короткого замыкания;
- силовых кабелей и трансформаторов на основе явления ВТСП;
- сверхпроводниковых накопителей энергии (СПИН).

### **3.1.4 Низкотемпературная сверхпроводимость**

*Криопроводимость* – явление высокой проводимости некоторых чистых металлов при очень низких (криогенных температурах). Материалы, имеющие в этом отношении особо выгодные свойства, называются криопроводниками. Удельное сопротивление у них на 3–4 порядка меньше, чем при нормальной температуре, и составляет при-

мерно  $\rho = 10^{-9}$  Ом·м. У обычных же металлов удельное сопротивление при низкой температуре примерно на один порядок ниже, чем при нормальной.

Хотя криопроводники по удельной проводимости не могут соперничать со сверхпроводниками, они имеют преимущество: нет необходимости добиваться температур, близких к абсолютному нулю. При этом можно использовать жидкий водород или жидкий азот, а не жидкий гелий.

Плотность тока в криопроводниках на 1–2 порядка больше, чем у обычных проводников. Наиболее перспективно применение криопроводников в электрических машинах и мощных кабелях (уменьшаются потери, уменьшаются размеры, увеличивается мощность).

В области температур жидкого водорода  $\sim 20$  К лучшим криопроводником является алюминий, материал дешевый, но требующий достаточно низкой температуры для получения нужной электропроводности.

А в области температуры жидкого азота  $\sim 77$  К – бериллий, дорогой и дефицитный материал, но требующий меньшего охлаждения, чем алюминий. Ведущими фирмами уже давно разработаны криопроводящие кабели на напряжения 110–275 кВ, однако они становятся выгодными лишь при необходимости передачи мощности 2–3 ГВт.

Следует отметить, что появление достаточно технологичных ВТСП снизило интерес к криопроводникам.

### **3.1.5 Проводниковые материалы высокой удельной проводимости**

*Медь.* Обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими проводниковыми материалами:

- а) малое удельное сопротивление  $\rho = 0,0172 \cdot 10^{-6}$  Ом·м (из всех металлов только у серебра  $\rho$  меньше, чем у меди);
- б) достаточно высокая механическая прочность;
- в) достаточная стойкость к коррозии;
- г) легкость пайки и сварки.

Медь делят на твердую (МТ) и мягкую (ММ). Медь твердую получают при ее холодной протяжке. Эта медь твердая, упругая и прочная. Из нее изготавливают контактные провода, шины распределительных устройств, пластины коллекторов электрических машин.

Если медь нагреть до нескольких сотен градусов и далее охладить (отжиг меди) – получится мягкая медь. Она более пластичная, удлиняется при разрыве. Применяется для изготовления проволоки (жилы кабелей, обмоточные провода трансформаторов и электрических машин) – т. е. там, где важна гибкость.

*Алюминий.* Второй по значению проводниковый материал.

Алюминий в 3,5 раза легче меди, но хуже по механическим характеристикам, также имеет удельное сопротивление в 1,63 раза больше, чем у меди ( $\rho = 0,028 \cdot 10^{-6}$  Ом·м).

Благодаря малому весу алюминий оказывается выгодней меди при изготовлении проводов воздушных линий электропередачи.

Алюминий активно окисляется на воздухе и покрывается оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Эта пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает переходное сопротивление в месте контакта.

Для воздушных линий широко применяют сталеалюминиевый провод, провод, выполненный из алюминия со стальной внутренней жилой.

Такой провод обладает высокой механической прочностью и достаточно высокой электропроводностью.

Кроме того, из алюминия изготавливают шины распределительных устройств, обмотку трансформаторов и электродвигателей, жилы кабеля.

*Сталь.* Достаточно дешевый проводниковый материал, обладающий высокой механической прочностью, но относительно высоким удельным сопротивлением,  $\rho = 0,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Из стали изготавливают внутренние жилы сталеалюминиевых проводов, а при необходимости и сами провода.

### **3.1.6 Проводниковые материалы высокого удельного сопротивления**

Применяются в электронагревательных приборах, реостатах, образцовых сопротивлениях и измерительных приборах. Во всех этих случаях требуется как можно большее сопротивление проводника. Обычно это сплавы.

*Манганин* – сплав меди, марганца и никеля (Cu – 84–86 %; Ni – 2–3 %; Mn – 12 %). Имеет удельное сопротивление  $\rho = 0,42–0,47 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Из него изготавливают проволоки для резисторов и потенциометров высокого класса. Манганин имеет температуру

плавления  $t_{\text{плав}} = 960 \text{ }^\circ\text{C}$  и максимальную рабочую температуру  $t_{\text{макс раб}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Константан* – то же, сплав меди, никеля и марганца (Cu – 58–60 %; Ni – 32–40 %; Mn – 1–2 %). Имеет следующие основные характеристики:  $\rho = 0,48\text{--}10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $t_{\text{плав}} = 1\,260 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{макс раб}} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Материал более дорогой, чем манганин, и имеет высокую стабильность удельного сопротивления в широком диапазоне изменения температур. Область применения та же, что и у манганина.

*Нихром* – сплав никеля, хрома и железа (Cr – 15–18 %; Ni – 55–61 %; остальное железо). Нихромы применяются для изготовления электронагревательных приборов. Удельное сопротивление нихрома  $\rho = 1,06\text{--}1,17\cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , максимальная рабочая температура  $t_{\text{макс раб}} = 950\text{--}1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Хромаль* – сплав хрома, алюминия, никеля и железа (Cr – 26–28 %; Ni = 0,6 %; Al = 5–5,8 %; остальное железо). Более дешевый материал по сравнению с нихромом, но более хрупкий. Применяется для изготовления мощных электронагревательных приборов. Удельное сопротивление хромалей достигает очень высоких для проводников значений  $\rho = 1,3\text{--}1,5\cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Максимальная рабочая температура –  $t_{\text{макс раб}} = 1\,000\text{--}1\,150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.1.7 Специальные материалы

*Припои* – это специальные сплавы и иногда чистые металлы, применяемые при пайке металлических частей в качестве связующего материала.

Припои принято делить на две группы – мягкие и твердые. Это деление связано с их температурой плавления.

Мягкие имеют температуру плавления ниже  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , твердые – выше  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Кроме того, мягкие припои имеют низкий предел прочности на растяжение ( $\sigma_p = 50\text{--}70 \text{ МПа/см}^2$ ), а твердые – высокий ( $\sigma_p = 100\text{--}500 \text{ МПа/см}^2$ ).

Выбирают припои в соответствии с типом паяемого металла, требуемой механической прочностью, коррозионной стойкостью. Необходимо также учитывать значение удельной проводимости припоя.

Название припоя, как правило, определяется металлами, входящими в него в наибольшем количестве. В условных обозначениях марок припоев буквы имеют следующую расшифровку: П – припой,

остальные буквы соответствуют основным компонентам; О – олово, С – свинец, Ср – серебро, Су – сурьма, А – алюминий, Н – никель, М – медь, Ц – цинк, Кр – кремний, К – кадмий.

Наиболее распространенные мягкие припои – оловянно-свинцовые:

ПОС-61 – припой оловянно-свинцовый (61 % олова, остальное свинец). Аналогично, ПОСС, ПОСК и т. д.

Наиболее распространенные твердые припои медно-цинковые и серебряные. ПМЦ – припой медно-цинковый; ПС<sub>р</sub> – припой серебряный (серебра 25–50 %, остальное кадмий и фосфор).

Для пайки алюминия и его сплавов применяют припой П 425А, состоящий из алюминия, меди и цинка, с температурой плавления 425 °С и силумин, состоящий в основном из алюминия и кремния (температура плавления 577 °С).

Выбор припоев для различных металлов производится по справочнику.

*Контактные материалы.* Контакт – это место перехода из одной токоведущей детали в другую. По условиям работы контакты принято делить на неподвижные, коммутирующие и скользящие.

По значению коммутируемого тока контакты делят на слаботочные (до единиц А) и силовоточные (от единиц А до кА).

Контакт должен обеспечивать надежное соединение двух проводников и обладать малым и стабильным электрическим сопротивлением.

В процессе эксплуатации контакты подвергаются износу за счет эрозии, электрического и механического воздействия и сваривания.

Коммутирующие контакты должны противостоять всем этим воздействиям.

Слаботочные контакты чаще всего изготавливают из серебра и его сплавов.

Серебро обеспечивает малый нагрев контактов и быстрый отвод тепла от контактных точек, так как обладает самым низким удельным сопротивлением среди проводниковых материалов ( $\rho = 0,016 \cdot 10^{-6}$  Ом·м). Кроме того, серебро почти не окисляется в нормальных условиях (без воздействия сернистых соединений). Добавление меди к серебру повышает твердость и износостойкость контактов, однако такие сплавы требуют больших механических усилий прижимающих контакты, так как у них неустойчивое переходное сопротивление из-за окисления.

Серебро и его сплавы применяют в различных видах реле, контакторах, магнитных пускателях, автоматах питания.

Для силовых контактов чаще всего используют материалы, изготовленные методом порошковой металлургии.

При этом одна фаза этих смесей обеспечивает высокую электропроводность, а другая имеет высокую тугоплавкость.

Например, серебро и медь обеспечивают необходимую электропроводность, а вольфрам, молибден и графит – высокую износостойкость и сопротивление свариванию контактов. Например, композиция медь-графит не сваривается при коммутации токов 30–100 кА. Медно-вольфрамовые контакты используют в мощных масляных и воздушных выключателях, а медь-молибден – в маломасляных выключателях. Композиции медь-висмут-бор и хром-медь-вольфрам применяются для изготовления контактов вакуумных выключателей.

### Контрольные вопросы

1. Что такое сверхпроводимость?
2. Какова область применения сверхпроводников в электроэнергетике?
3. Что такое высокотемпературная сверхпроводимость?
4. Назовите преимущества и недостатки основных проводниковых материалов высокой проводимости.
5. Перечислите основные проводниковые материалы высокого удельного сопротивления. Какова область их применения?

### 3.2 Полупроводниковые материалы

Точного определения понятия «полупроводник» не существует. Но в общем случае, полупроводники – это материалы, которые с точки зрения проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Их удельные сопротивления находятся в пределах  $10^{-6}$ – $10^8$  Ом·м. Границы имеют условный характер. Более высокое удельное сопротивление у полупроводников по сравнению с металлами объясняется меньшей концентрацией свободных электронов (примерно на три порядка), но свободных электронов в полупроводниках гораздо больше, чем в диэлектриках.

Основной принцип классификации полупроводников основан на механизме электропроводности: их делят на полупроводники типа *n*

(имеют электронную электропроводность) и полупроводники типа  $p$  (имеют дырочную электропроводность).

Свободные электроны в полупроводниках возникают в результате ионизации атомов самого полупроводника либо примеси. Освобожденный электрон оставляет после себя в валентной зоне свободное место (дырку). Это место может занять электрон другого атома, в результате у него появится дырка и т. д. Таким образом происходит движение валентных электронов (не свободных), которое удобнее представить как движение дырок. Дырки двигаются в сторону, противоположную движению электрона, и гораздо медленнее, чем свободные электроны. Движение дырок имеет прерывистый характер.

Полупроводниковые материалы принято делить:

- на простые полупроводники (химические элементы);
- сложные, т. е. полупроводниковые (химические соединения);
- полупроводниковые комплексы (в которых имеется целый комплекс материалов с разной проводимостью).

Вводя в полупроводниковые материалы различные примеси, можно достигать необходимого типа электропроводности. Примеси, вызывающие электропроводность типа  $n$ , называют донорными. Примеси, вызывающие  $p$ -электропроводность, называют акцепторными. Существующие два типа электропроводности в полупроводниках представляют собой реальные физические процессы. В этом можно убедиться с помощью эффекта Холла.

Если пластину из полупроводника поместить в поперечное магнитное поле с напряженностью  $H$  и продольное электрическое поле с напряженностью  $E$ , то в полупроводнике будет происходить смещение основных носителей зарядов: дырок или электронов (рис. 3.6), в зависимости от типа электропроводности полупроводника.

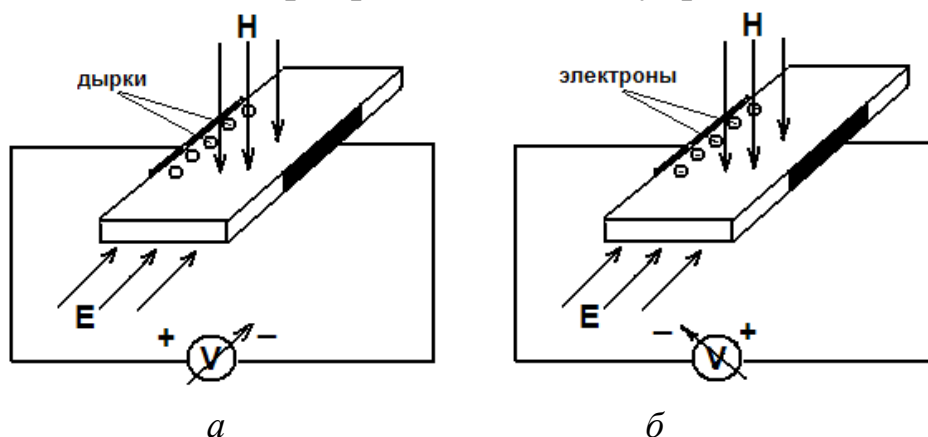


Рис. 3.6. Смещение основных носителей зарядов в полупроводниках по эффекту Холла: а – полупроводник  $p$ -типа; б – полупроводник  $n$ -типа



Иногда ошибочно считают, что полупроводники имеют свойство выпрямителя. Такое свойство имеет лишь  $p-n$ -переход. Им называется граница, отделяющая друг от друга области с дырочной и электронной проводимостью.

Эффект выпрямления в  $p-n$ -переходе вызван диффузией зарядов (рис. 3.7). В результате электроны из области с  $n$ -проводимостью проникают в область  $p$ -проводимости и оставляют за собой область нескомпенсированных положительных зарядов. Аналогично происходит диффузия дырок. Носителей зарядов в запиорном слое мало, поэтому он не пропускает электрический ток.

Если к запиорному слою приложить поле, совпадающее с направлением  $E_{диф}$ , то запиорный слой только увеличится и движения носителей зарядов также не будет.

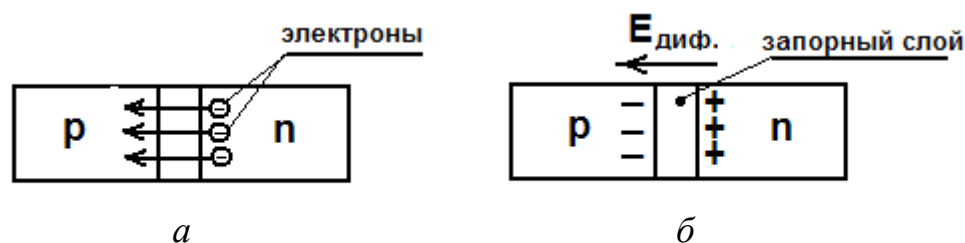


Рис. 3.7. К объяснению образования запиорного слоя в полупроводниках:  
а – диффузия зарядов; б – запиорный слой

Если же к  $p-n$ -переходу приложить встречное поле, то оно легко скомпенсирует  $E_{диф}$  (при  $U \approx 1\text{В}$ ) и через запиорный слой начнет протекать электрический ток. На этом принципе и работают полупроводниковые выпрямители. С помощью  $p-n$ -переходов можно создать и приборы, усиливающие токи и напряжения, – транзисторы и т. д.

### Основные простые полупроводниковые материалы

**Германий (Ge).** Исходным сырьевым материалом для его получения служат цинковые и сульфидные руды (соединение металлов с серой). В результате сложных химических процессов получают слитки германия. Далее германий очищают. В очищенном германии примесей должно быть не более  $5 \cdot 10^{-9} \%$ . Чтобы получить монокристаллы, германий плавят при температуре  $940 \text{ }^\circ\text{C}$  и при этом добавляют донорные или акцепторные примеси, чтобы получить  $n$ - или  $p$ -проводимости. Чистый германий имеет  $\rho \approx 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\epsilon_r = 16,3$ . Из германия изготавливают диоды, транзисторы, фотоэлементы.

*Кремний* (Si). Получают из широко распространенного кремнезема  $\text{SiO}_2$ . После получения кремния производится его очистка. При этом примесей должно быть не более  $10^{-11}$  %. С помощью зонной плавки получают монокристаллы кремния. А добавляя легирующие примеси, получают *n*- или *p*-проводимость. Чистый кремний имеет следующие характеристики:  $\rho = 2,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r = 11,7$ ;  $t_{\text{плав}} = 1\,417 \text{ }^\circ\text{C}$ . Кремний используется в диодах, транзисторах, интегральных микросхемах. В электротехнике применяются силовые кремниевые диоды и тиристоры (ключи управления), в том числе и высоковольтные.

*Селен* (Se). Побочный продукт производства меди. Кристаллический селен имеет следующие основные характеристики:  $\rho = 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r = 6,3$ ;  $t_{\text{плав}} = 217 \text{ }^\circ\text{C}$ . Промышленность выпускает селеновые выпрямители, фотоэлементы, фоторезисторы.

### **Полупроводниковые химические соединения**

В данной дисциплине имеет смысл рассматривать материалы, непосредственно используемые в электротехнике и электроэнергетике. К таким материалам можно отнести следующие.

*Карбид кремния* (SiC). Поликристаллический материал с нелинейной зависимостью между током и напряжением. Получают в результате химического соединения кремния и углерода. Исходные материалы песок и каменный уголь. Легируют примесями: висмут, магний, алюминий, фосфор, сурьма. Основные характеристики карбида кремния:  $\rho = 10^{-2} - 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r = 6,5 - 7,5$ ;  $t_{\text{плав}} = 2\,700 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Из карбида кремния изготавливают нелинейные резисторы, широко применяемые в вентильных разрядниках (аппаратах защиты изоляции от перенапряжений).

*Оксид цинка* (ZnO). Оксид цинка – кристаллический материал, получаемый либо при сжигании цинка, либо при обжиге на воздухе сернистого цинка, или при прокаливании солей, содержащих цинк. Основные параметры оксида цинка:  $\rho = 10^8 - 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r = 8,5$ ;  $t_{\text{плав}} = 1\,980 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Керамический материал, который можно рассматривать как полупроводник, образованный проводящими кристаллами ZnO кубической формы и межкристаллическими потенциальными барьерами. Для получения высокой нелинейности материала необходима однородность структуры на микроскопическом уровне.

На основе оксида цинка изготавливают варисторы (резисторы с нелинейной вольтамперной характеристикой). Эти варисторы представляют основу нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН),

широко внедряемых в электрических сетях всех классов номинального напряжения. В настоящее время ОПН считается лучшим средством защиты изоляции электрооборудования от перенапряжений. Они устанавливаются взамен вентильных разрядников.

Оксидно-цинковые варисторы, используемые в ОПН, имеют существенно более высокую степень нелинейности вольтамперной характеристики по сравнению с карбидокремниевыми (SiC) резисторами, применяемыми в вентильных разрядниках (РВ). Это позволяет устанавливать варистор между фазой и землей параллельно изоляции защищаемого объекта без искрового промежутка. В результате уровень защиты ОПН определяется не характеристиками пробоя и гашения дуги в искровом промежутке, а только вольтамперной характеристикой варистора.

В нормальном рабочем режиме сопротивление варистора велико и ток через ОПН составляет доли миллиампера. При воздействии перенапряжения варистор переходит в проводящее состояние и ток может достигать десятка килоампер и более, что и приводит к ограничению дальнейшего нарастания напряжения. Когда напряжение снижается, ограничитель возвращается в исходное непроводящее состояние.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните механизм электропроводности в полупроводниках разного типа.
2. Как можно определить тип электропроводности полупроводника?
3. Назовите основные простые полупроводниковые материалы.
4. Каковы особенности и область применения карбида кремния и оксида цинка?

### **3.3 Магнитные материалы**

Атом любого элемента схематически можно представить в виде положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него электронов. Электроны вращаются не только вокруг ядра, но и вокруг собственной оси. В результате создается орбитальный и спиновый магнитные моменты.

Решающую роль в создании магнитных свойств материалов играет магнитный момент электрона при вращении его вокруг своей оси – этот магнитный момент называется спином. При этом направ-

ление спинов может быть различным. Если спины в электронной оболочке атома нескомпенсированы, то атом в целом обладает магнитным моментом.

В соответствии с магнитными свойствами материалы делятся на следующие группы:

- диамагнитные (диамагнетики);
- парамагнитные (парамагнетики);
- ферромагнитные (ферромагнетики).

Способность материалов намагничиваться характеризуется относительной магнитной проницаемостью ( $\mu$ ).

Относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз магнитная индукция  $B$  в данном материале при воздействии магнитного поля больше или меньше, чем в вакууме. То есть, она является коэффициентом пропорциональности между индукцией и напряженностью приложенного магнитного поля  $H$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \cdot \vec{H}, \quad (3.7)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Чем больше  $\mu$ , тем легче намагничивается материал, и, наоборот, чем меньше  $\mu$ , тем в меньшей степени он может намагничиваться.

*Диамагнитные материалы.* Если магнитные моменты в атомах скомпенсированы, т. е. результирующий момент атомов равен нулю, то такой материал называется диамагнетиком.

У диамагнетиков при действии внешнего магнитного поля орбиты электронов деформируются и в атомах индуцируется магнитный момент, ослабляющий внешнее магнитное поле. Поэтому в них магнитная индукция  $B$  меньше, чем она была бы в вакууме, и магнитная проницаемость  $\mu < 1$ .

После снятия внешнего магнитного поля индуцированный магнитный момент диамагнетика, ослабляющий внешнее магнитное поле, исчезает. При этом электронные оболочки восстанавливаются.

Диамагнетиками являются все инертные газы, водород, органические материалы, вода, полупроводники и некоторые металлы: Cu, Zn, Ag, Au, Be, Pb, Hg.

*Парамагнитные материалы* отличаются тем, что их атомы имеют нескомпенсированные магнитные моменты, но они не упорядочены, пока материал находится не в магнитном поле. Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов ориентируются в направлении поля и усиливают его.

Поэтому в них магнитная индукция больше, чем в вакууме и  $\mu > 1$ . То есть, парамагнетики слабо намагничиваются, однако без внешнего магнитного поля они немагнитные. К ним относятся Al, Cr, Mg, O<sub>2</sub> и некоторые окислы, например, CuO.

*Ферромагнетики.* В ферромагнетиках сориентированы магнитные моменты атомов в целых областях – доменах. При этом материал в каждом домене намагничен до насыщения. Они намагничиваются даже в слабых полях, и эта намагниченность остается. Магнитная проницаемость у них  $\mu \gg 1$  (до  $10^6$ ) и зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ферромагнетикам относятся Fe, Ni, Co и их сплавы, ферриты (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с другими оксидами).

Эти материалы можно назвать магнитными, так как они намагничиваются под действием внешнего магнитного поля.

Протекание процессов намагничивания ферромагнетиков характеризуется кривыми намагничивания  $B = f(H)$ .

Следует отметить, что всякий магнитный материал обладает магнитными свойствами только до определенной температуры (температура Кюри  $\Theta_k$ ), по достижении которой магнитные свойства материала исчезают, т. е. он уже не может быть намагничен. Это обусловлено разрушением магнитных доменов из-за интенсивного теплового движения атомов и молекул. Температура Кюри находится в пределах от 45 °С у некоторых ферритов до 1 131 °С у кобальта. Так, у железа  $\Theta_k = 768$  °С.

Если производить намагничивание магнитного материала во внешнем магнитном поле и менять его напряженность от 0 до  $H$ , а затем до  $-H$ , то можно получить так называемую петлю магнитного гистерезиса (рис. 3.8).

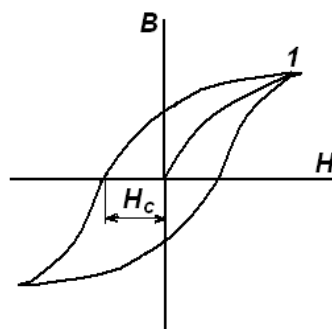


Рис. 3.8. Петля магнитного гистерезиса

Видно, что при уменьшении напряженности магнитного поля  $H$  от точки 1 (точка насыщения индукции) существует остаточная намагниченность. И надо приложить значительную отрицательную на-

пряженность, чтобы магнитная индукция стала равной нулю. Значение этой напряженности  $H_c$  называется коэрцитивной (задерживающей) силой.

Магнитные материалы с малым значением  $H_c$  и большой  $\mu$  называются магнитомягкими ( $H_c < 40$  А/м). Эти материалы легко намагничиваются и легко размагничиваются. Они отличаются малыми потерями на гистерезис, т. е. им соответствует узкая гистерезисная петля. Чем меньше примесей в магнитомягком материале, тем уже петля гистерезиса и меньше потери на перемагничивание. Одновременно стараются не искажать кристаллическую решетку (в материале не должно быть внутренних напряжений). Из магнитомягких материалов изготавливают сердечники электрических машин, трансформаторов и реле.

К основным магнитомягким материалам можно отнести пермаллои, альсиферы и электротехнические стали.

*Пермаллои* – железоникелевые сплавы с большим содержанием никеля ( $Ni = 36–80$  %), имеют малую коэрцитивную силу ( $H_c = 1–9$  А/м), в зависимости от количества никеля. Высокий уровень магнитных характеристик обеспечивается еще и тепловой обработкой (медленный нагрев и выдержка при  $100–150$  °С в течение 3–6 часов и плавное остывание). Из пермаллоев изготавливают сердечники дросселей, малогабаритных трансформаторов, магнитных усилителей.

*Альсиферы*. Сплавы алюминия, кремния и железа ( $H_c = 2,2$  А/м). На больших частотах у этих сплавов большие потери на вихревые токи, поэтому они хуже пермаллоев, но дешевле их. Область применения та же, что и у пермаллоев.

*Электротехнические стали*. Низкоуглеродистые стали с добавлением кремния для улучшения магнитных свойств. Чем больше кремния, тем лучше характеристики, но тем более хрупкие детали из этого материала. Поэтому содержание кремния  $Si \leq 4,8$  %.

Холоднокатаные стали, у которых кристаллы железа располагаются преимущественно в направлении прокатки, называются текстурированными. Они имеют  $H_c = 9,5–14$  А/м, у горячекатаных сталей  $H_c = 31–33$  А/м.

Область применения: сердечники электрических машин и трансформаторов.

Материалы с большим значением  $H_c > 40$  А/м называются магнитотвердыми материалами.

Из них изготавливают постоянные магниты. Они должны иметь возможно большую коэрцитивную силу  $H_c$  и остаточную индукцию.

Основные магнитотвердые материалы: мартенситные стали и железо-никель-алюминиевые сплавы.

*Мартенситные стали.* Мартенситная структура – это кристаллы железа, вытянутые в длину и имеющие высокое внутреннее напряжение. Их получают путем закалки высокоуглеродистых сталей. Постоянные магниты из мартенситных сталей получают после намагничивания деталей.

Вольфрамовые стали имеют  $H_c = 4\ 400$  А/м (содержание вольфрама ~ 6 %).

Кобальтовые стали имеют  $H_c = 1\ 100–13\ 500$  А/м.

*Железо-никель-алюминиевые сплавы.* Эти сплавы подвергаются специальной термической обработке и имеют коэрцитивную силу  $H_c = 4\ 200–200\ 000$  А/м. Они обладают высокими магнитными характеристиками. Наиболее распространенные марки этих сплавов: ЮН (Al, Ni); ЮНД (Al, Ni, Cu); ЮНДК (Al, NiCu, Co).

*Металлокерамика* – применяется для изготовления магнитов очень малых размеров и сложной формы. Ее получают путем спекания порошков железа, никеля, алюминия с добавлением кобальта, при высокой температуре.

*Ферриты* – изготавливают из порошковых смесей  $Fe_2O_3$  с другими окислами (ZnO, NiO и т. д.). Диапазон значений коэрцитивной силы у самых распространенных ферритов  $H_c = 0,06–54$  А/м. Ферриты бывают и магнитотвердые – например, феррит бария (на основе BaO и  $Fe_2O_3$ ), имеющий  $H_c = 128\ 000–212\ 000$  А/м.

Достоинства ферритов – стабильность магнитных характеристик в широком диапазоне частот.

### Контрольные вопросы

1. Что такое относительная магнитная проницаемость?
2. Объясните классификацию материалов по их магнитным свойствам.
3. Чем отличаются магнитомягкие материалы от магнитотвердых?
4. Что такое коэрцитивная сила?
5. Перечислите основные магнитомягкие материалы и назовите область их применения.
6. Перечислите основные магнитотвердые материалы и назовите область их применения

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ К МОДУЛЮ 3

## Лабораторная работа № 5

### Исследование свойств полупроводниковых материалов

Цель работы: исследование характеристик полупроводниковых приборов, освоение методики определения параметров терморезисторов, варисторов и диодов.

#### Основные положения

Полупроводники являются группой веществ, отличающихся значительной чувствительностью к воздействию ряда факторов: температуры, электрического поля, света и др. Полупроводники занимают среднее положение между диэлектриками и проводниками по характеру и величине электропроводности и по расположению заполненных и незаполненных энергетических зон. К полупроводникам относятся химические элементы германий, кремний, селен и др., большое число окислов, сульфидов и карбидов.

*Терморезистором*, или *термосопротивлением* (ТС), называется нелинейный резистор, величина сопротивления  $R$  которого резко уменьшается с увеличением температуры. Полупроводниковые ТС изготавливают из окислов меди, марганца; никеля, кобальта и других материалов.

Большой температурный коэффициент ( $\alpha_R$ ) ТС позволяет использовать их в качестве термометров сопротивления для целей измерения и регулирования температуры, в качестве термокомпенсаторов, стабилизаторов напряжения в электрических цепях, а также в автоматике, телемеханике и т. д.

Температурная зависимость сопротивления  $R_T$  в терморезисторе является его главной характеристикой и следует экспоненциальному закону

$$R_T = A \cdot e^{B/T}, \quad (3.8)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные величины,  
 $T$  – абсолютная температура, К.



Для практических расчетов удобнее пользоваться формулой

$$R_T = R_{T_0} \cdot e^{\frac{B \cdot T_0 - T}{T_0 \cdot T}}, \quad (3.9)$$

где  $R_{T_0}$  – величина сопротивления при температуре 20 °С, ее называют холодным сопротивлением.

Постоянная  $B$ , характеризующая температурную чувствительность ТС во всем интервале его рабочих температур, определяется экспериментально путем измерения сопротивления ТС при двух температурах  $T$  и  $T_0$  по формуле

$$B = \frac{2,3 \cdot \Delta \ln \cdot R}{\Delta \left( \frac{1}{T} \right)}, \quad (3.10)$$

где

$$\Delta \ln \cdot R = \ln \cdot R_T - \ln \cdot R_{T_0}, \quad \Delta \left( \frac{1}{T} \right) = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}. \quad (3.11)$$

Если определять температурный коэффициент сопротивления ТС по уравнению  $\alpha_\rho = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$ , то из уравнения (3.8) следует:

$$\alpha_\rho = -\frac{B}{T^2}. \quad (3.12)$$

Практически удобней пользоваться формулой для определения электропроводности полупроводников

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{W_\vartheta}{2kT}}, \quad (3.13)$$

где  $W_\vartheta$  – работа переброса электрона в заполненную зону, эВ;

$k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Формула (3.13) позволяет рассчитать работу переброса электрона в заполненную зону данного полупроводника. Для этого уравнение (3.13) логарифмируют

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{W_\vartheta}{2k} \cdot \frac{1}{T} \quad (3.14)$$

и в полученное уравнение (3.14) из графика  $\ln \gamma = f(1/T)$  подставляют два любых значения  $\ln \gamma$  и соответствующие им значения  $1/T$ .

Тогда по системе двух уравнений с двумя неизвестными находят  $W_{\text{Э}}$  (Дж), величину которой затем переводят в электрон-вольты ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

К важнейшим характеристикам ТС принадлежат статические вольтамперные характеристики, т. е. зависимости  $U = f(I)$ , которые называют вольтамперными характеристиками (в.а.х.) (рис. 3.9).

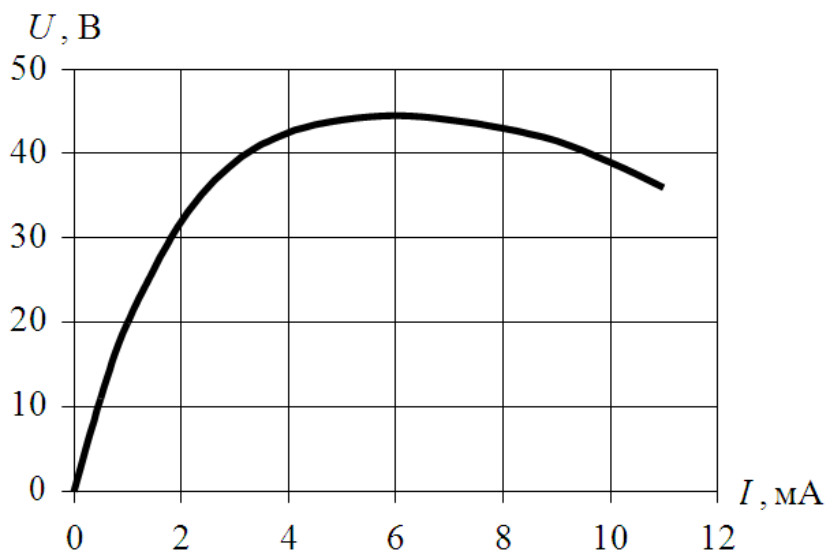


Рис. 3.9. Вольтамперная характеристика ТС типа ММТ-4

Форма в.а.х. ТС определяется четырьмя основными параметрами:  $A$ ,  $B$ ,  $T$ ,  $H$ , где  $H$  – коэффициент рассеяния в Вт/К, численно равный мощности, рассеиваемой на ТС при разности температур образца и окружающей среды в  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Величину коэффициента рассеяния  $H$  для отдельного образца легко определить по его в.а.х. и зависимости  $R(T)$ . Для любой точки в.а.х.  $R = U/I$  и  $P = UI$ . Пользуясь кривой  $R(T)$ , нетрудно построить график зависимости  $P(T)$ , по которому и рассчитываются значения коэффициента рассеяния

$$H = \frac{\Delta P}{\Delta T}. \quad (3.15)$$

Зная  $H$ , можно определить коэффициент энергетической чувствительности ТС

$$G = \frac{H}{100 \cdot \alpha_T}, \quad (3.16)$$

численно равный мощности, которую нужно рассеять на ТС для уменьшения его сопротивления на 1 %.

Нелинейный полупроводниковый *варистор* – это резистор, величина сопротивления которого сильно зависит от напряженности электрического поля. В.а.х. варистора является симметричной (рис. 3.10) и выражается формулой

$$I = B \cdot U^\beta, \quad (3.17)$$

где  $B$  – постоянная,  $\beta$  – коэффициент нелинейности.

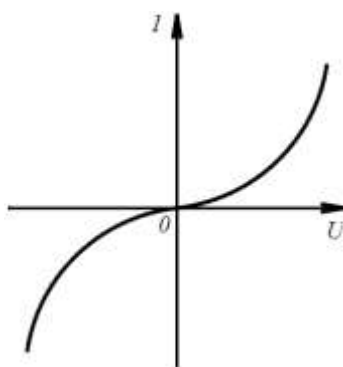


Рис. 3.10. Вольтамперная характеристика варисторов типа СН1-2

Коэффициент  $\beta$  не является постоянным для данной в.а.х. и изменяется в зависимости от приложенного напряжения

$$\beta = \frac{\lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{\lg\left(\frac{U_2}{U_1}\right)}, \quad (3.18)$$

где  $\beta$  – средний коэффициент нелинейности между двумя точками:  $(I_1, U_1)$  и  $(I_2, U_2)$ .

Имея ряд осциллограмм напряжения, снятых при условии  $r_n \ll r_{ст}$  варистора, можно построить его в.а.х. Этот метод получения в.а.х. варистора используется в лабораторной работе.

Варисторы используются для защиты высоковольтных линий электропередачи, в телефонии и радиотехнике, для умножения частоты, сглаживания и стабилизации напряжения в вычислительных машинах.

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для снятия температурной зависимости сопротивления термистора и его вольтамперной характеристики состоит из параметрического источника тока, получающего питание от трехфазной цепи переменного тока. С помощью источника тока в работе устанавливается значение силы тока и измеряется падение напряжения на термисторе. Температура термистора измеряется цифровым термометром. Температура термистора изменяется под действием двух факторов: регулированием окружающей его температуры термостатом, разогревом термистора протекающим током.

Вольтамперные характеристики диода и варистора снимаются по схеме, состоящей из регулируемого двуполярного источника постоянного напряжения, цифрового вольтметра и миллиамперметра.

### Порядок выполнения работы

#### 1. Снятие в.а.х. термистора.

Постепенно увеличивать силу тока через термистор от минимального до максимального значения. После прекращения изменения температуры и напряжения записывать показания миллиамперметра и вольтметра. Данные измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

$U, В$								
$I, мА$								

Определение температурной зависимости сопротивления термистора и вычисление его электропроводности.

Измерения сопротивления произвести при температуре окружающей среды, а затем, увеличивая температуру до 100 °С, определять сопротивление термистора желательно при подаче малых значений силы тока. По полученным значениям сопротивления исследуемого термистора определить его электропроводность при разных температурах по формуле

$$\gamma = \frac{1}{R_T}. \quad (3.19)$$

Измеренные значения величин занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерений

Измерено			Вычислено				
$t, ^\circ\text{C}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$T, \text{К}$	$1/T$	$R_T, \text{кОм}$	$\gamma, \text{См}$	$\ln \gamma$
...							
...							
100							

2. Снятие в.а.х. варистора.

Постепенно поднимая напряжение на варисторе от минимального до максимального, снять показания вольтметра и амперметра. Данные измерений занести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты измерений

$U, \text{В}$								
$I, \text{мА}$								
$\beta$	–							

3. Снятие в.а.х. полупроводникового диода.

Постепенно поднимая напряжение на диоде от минимального до максимального, снять показания вольтметра и амперметра. Данные измерений занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты измерений

$U, \text{В}$								
$I, \text{мА}$								

### Содержание отчета

Отчет должен включать:

- цель работы;
- выполненную подготовку к работе;
- расчетные формулы, используемые в работе;

- график зависимости  $I(U)$  для термистора;
- графики зависимостей  $R_T(T)$  и  $\ln \gamma (1/T)$ ;
- определение постоянной  $B$ , температурного коэффициента;
- сопротивления термистора  $\alpha_p$  и работы переброса электрона в незаполненную зону  $W_\Sigma$ ;
- определение коэффициентов рассеяния  $H$  и энергетической чувствительности  $G$  для термистора;
- график зависимости  $I(U)$  для варистора;
- вычисление коэффициента нелинейности варистора. При этом берутся два значения напряжения и соответствующие им токи;
- график зависимости  $I(U)$  для полупроводникового диода;
- анализ и выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Особенность полупроводников по сравнению с проводниками и диэлектриками.
2. Диапазон удельных сопротивлений полупроводниковых материалов. Техническое применение полупроводников. Привести примеры.
3. Вольтамперная характеристика термистора. Объяснить нелинейность.
4. Зависимость удельной электрической электропроводимости полупроводников от различных факторов.
5. Собственная и примесная электропроводность полупроводников.
6. Зависимость электропроводимости примесного полупроводника от температуры. Напишите формулу и объясните входящие в нее величины.
7. Влияние электрического и магнитного полей на проводимость полупроводников.
8. Вольтамперная характеристика варистора. Объяснить нелинейность.
9. Свойства  $p-n$ -перехода. Пояснить его работу.
10. Вольтамперная характеристика  $p-n$ -перехода.

## Лабораторная работа № 6

### Исследование свойств магнитных материалов

Цель работы: освоение методики исследования магнитных свойств и экспериментальное определение некоторых магнитных характеристик ферромагнитных материалов.

#### Основные положения

Свойства ферромагнитных материалов характеризуются основной кривой намагничивания – зависимостью  $B = f(H)$  при плавном увеличении напряженности магнитного поля  $H$  и петлей гистерезиса – зависимостью  $B = f(H)$  при циклическом изменении  $H$  (см. рис. 3.11). По мере увеличения  $H$  магнитная проницаемость вначале растет, достигает максимума, однако затем наступает состояние магнитного насыщения и магнитная проницаемость уменьшается. При циклическом изменении  $H$  обнаруживается остаточная намагниченность  $B_r$  при  $H = 0$ . Для устранения остаточной намагниченности необходимо воздействовать на образец напряженностью магнитного поля противоположного направления  $H_c$ , которая называется коэрцитивной силой.

Гистерезис, остаточная намагниченность и коэрцитивная сила обусловлены затрудненностью ориентации доменов по направлению магнитного поля, с этим в основном связаны потери энергии на перемагничивание (или потери на гистерезис  $P_r$ ).

В условиях переменного магнитного поля в материале индуцируется электродвижущая сила, вызывающая вихревые токи, которые замыкаются в толще материала. При этом возникают потери на вихревые токи  $P_v$ . Таким образом, полная мощность, теряемая в магнитном материале

$$P = P_r + P_v. \quad (3.20)$$

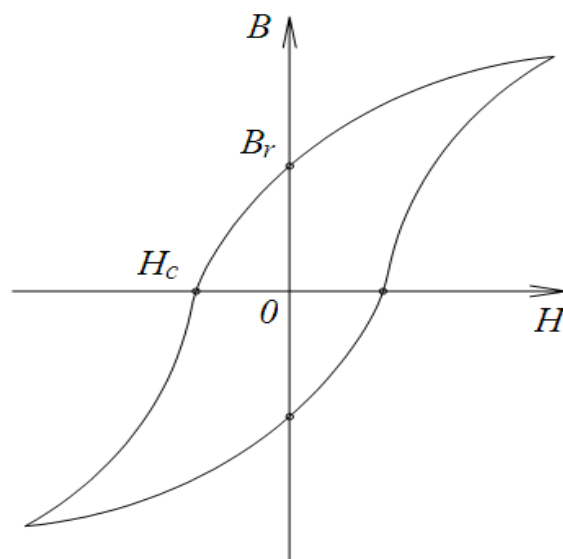


Рис. 3.11. Петля гистерезиса

Суммарная мощность потерь характеризует данное конкретное изделие. Для сравнительной характеристики материалов используют удельную мощность потерь

$$P = P/m,$$

где  $m$  – масса испытанного образца.

Потери на гистерезис рассчитывают по формуле

$$P_G = \eta \cdot f \cdot B_{\max}^n \cdot V = a \cdot f \cdot V, \quad (3.21)$$

а потери на вихревые токи определяют из выражения

$$P_B = \xi \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot V = b \cdot f^2 \cdot V, \quad (3.22)$$

где  $\eta, \xi$  – коэффициенты, зависящие от свойств данного материала;

$f$  – частота перемагничивания, Гц;

$B_{\max}$  – величина магнитной индукции, Тл;

$V$  – объем ферромагнетика, м<sup>3</sup>;

$n = 1,6...2$  – показатель степени, зависящий от природы материала.



Простейшая магнитная цепь состоит из магнитопровода с поперечным сечением  $S$ , на котором равномерно размещена обмотка с числом витков  $w$  проводника с постоянным током  $I$ , под действием которого создается однородное магнитное поле с напряженностью

$$H = wI / l_{cp}, \quad (3.23)$$

где  $l_{cp}$  – средняя длина линии магнитопровода, м.

Магнитная индукция в сердечнике с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r$  соответственно составит

$$B = \mu_k \mu_0 H, \quad (3.24)$$

где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

При этом магнитный поток в магнитопроводе

$$\Phi = BS = \mu_k \mu_0 wIS / l_{cp}. \quad (3.25)$$

Произведение  $wI = F$  называется магнитодвижущей силой, а отношение  $l_{cp} / \mu_k \mu_0 S = R_M$  – магнитным сопротивлением магнитной цепи. С учетом этого выражение (3.25) для магнитного потока приводится к виду

$$\Phi = F / R_M. \quad (3.26)$$

Выражение (3.26) определяет основной закон магнитной цепи – аналог закона Ома. В сложных магнитных цепях общий магнитный поток  $\Phi$  разветвляется по нескольким направлениям, при этом он оказывается равным алгебраической сумме магнитных потоков в ветвях разветвления – аналог первого закона Кирхгофа для магнитной цепи (3.28).

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \Phi_i. \quad (3.27)$$

На параллельных ветвях разветвленной магнитной цепи с напряженностями магнитного поля  $H_1$  и  $H_2$  и средними длинами  $l_1$  и  $l_2$  участков параллельных ветвей магнитные напряжения  $H_1 l_1 = H_2 l_2$ . При этом магнитный поток распределяется обратно пропорционально магнитным сопротивлениям параллельных ветвей  $\Phi_1 / \Phi_2 = R_{M2} / R_{M1}$ .

При наличии последовательной магнитной цепи с несколькими источниками магнитодвижущей силы (с несколькими катушками с током на одном магнитопроводе) в соответствии с аналогией закону Ома для магнитной цепи магнитный поток прямо пропорционален алгебраической сумме магнитодвижущих сил, действующих в цепи, и обратно пропорционален сумме магнитных сопротивлений ее участков (3.29).

$$\Phi = \frac{\sum_{i=1}^n I_i w_i}{\sum_{k=1}^m R_{Mk}}, \quad (3.28)$$

или равенство можно привести к виду

$$\sum_{k=1}^m H_k l_k = \sum_{i=1}^n w_i I_i. \quad (3.29)$$

Выражение (3.29) представляет собой аналог второго закона Кирхгофа для магнитной цепи.

Нелинейность зависимости  $B = f(H)$  для магнитных материалов обуславливает нелинейность зависимости  $\Phi = f(I)$ , а следовательно, и индуктивности  $L$ , как коэффициента пропорциональности между магнитным потоком и силой электрического тока. Таким образом, наличие в электрической цепи катушки индуктивности с сердечником из магнитного материала, т. е. нелинейного элемента, искажает форму кривой электрического тока. Использование магнитопровода из магнитных материалов позволяет получать большие значения индуктивностей при малых габаритах аппаратов.

Постоянные магниты благодаря достигнутым за последнее время высоким характеристикам сплавов, из которых они выполняются, получили широкое распространение в самых различных областях техники.

Их используют для создания постоянного магнитного поля в устройствах, преобразующих электрическую энергию в механическую (поляризованные и магнитоэлектрические системы аппаратов, регистрирующие устройства, магнетроны, фокусирующие устройства, дугогасящие системы аппаратов и т. д.).

Они применяются также в устройствах, преобразующих механическую энергию в электрическую (магнето, микрофоны, электрогенераторы и т. д.). В ряде случаев с помощью постоянных магнитов создают механическую силу, действующую на детали из ферромагнитных материалов (магнитные плиты, синхронные передатчики моментов, замки, сепараторы, подъемные устройства и т. д.).

Широкое применение нашли постоянные магниты в качестве тормозных магнитов, например, в различных индукционных системах электрических аппаратов.

Магнитотвердые материалы, из которых изготовляют постоянные магниты, характеризуются широкой петлей гистерезиса (большой коэрцитивной силой) и малой магнитной проницаемостью. Важнейшей характеристикой является участок нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса, заключенный между  $B_r$  и  $H_c$ . Этот участок называется *кривой размагничивания*.

Графическая, или табличная, форма задания кривой размагничивания не дает возможности в общем виде анализировать устройства с применением магнитотвердых материалов. Поэтому часто пользуются приближенными аналитическими выражениями для кривой размагничивания магнитотвердых материалов.

Экспериментальные данные для различных материалов показывают, что кривые размагничивания достаточно хорошо изображаются равносторонними гиперболой с асимптотами, параллельными осям  $B$  и  $H$ . Уравнение такой гиперболы относительно своих асимптот  $xy = c0^2$ . При переходе к координатам  $B$  и  $H$  следует произвести параллельный перенос и поворот осей координат.

Если учесть, что кривая должна проходить через точки  $B_r$  и  $H_c$ , то получится следующее аналитическое выражение кривой размагничивания

$$B = \frac{B_r(H_c - H)}{H_c - aH}, \quad (3.30)$$

где  $a$  – коэффициент выпуклости.

### Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки показана на рисунке 3.12. Схема содержит звуковой генератор, осциллограф  $PV$ , резисторы  $R_1$  и  $R_0$ , конденсатор  $C$  и образец магнитного материала.

Исследуется тороидальный образец из магнитомягкого материала: средний радиус  $r_{cp} = 18,75$  мм, площадь поперечного сечения  $S = 10 \times 15$  мм<sup>2</sup>, масса  $g = 0,15$  кг. Число витков обмотки возбуждения  $\omega_1 = 25$ , измерительной  $\omega_2 = 30$ ,  $C = 2$  мкФ,  $R_0 = 30$  Ом,  $R_1 = 8$  кОм.

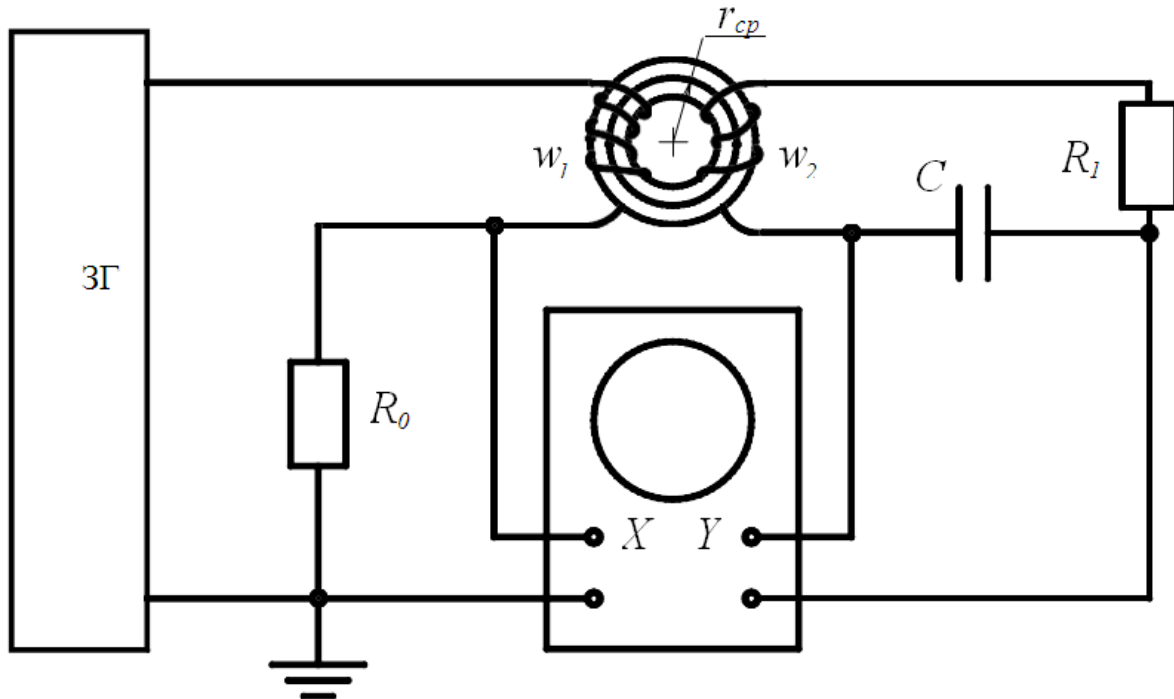


Рис. 3.12. Лабораторная установка

Напряженность магнитного поля в образце пропорциональна току в намагничивающей обмотке  $\omega_1$  образца и, следовательно, падению напряжения на сопротивлении  $R_0$ . Это напряжение прикладывается к горизонтальному входу осциллографа. Под действием переменного магнитного поля в обмотке возникает электродвижущая сила  $E_2$ . На вертикальный вход осциллографа подается напряжение  $U_C$ , пропорциональное  $E_2$ .

Так как сопротивление  $R_1 \gg 1/\omega C$ , можно считать, что  $I \approx E_2/R_1$ . Электродвижущая сила во вторичной обмотке

$$E_2 = \omega_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt}, \quad (3.31)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Тогда

$$U_c = \frac{1}{R_1 C} \int E_2 dt = \frac{\omega_2 S B}{R_1 C}. \quad (3.32)$$

Отсюда видно, что напряжение на конденсаторе  $C$  пропорционально магнитной индукции в образце. Таким образом, на экране осциллографа можно наблюдать петлю гистерезиса в координатах, в определенном масштабе, пропорциональных напряженности магнитного поля.

### Порядок выполнения работы

1. Проведение эксперимента.

2. Снять петлю гистерезиса:

– подготовить приборы к включению, для чего регулятор напряжения на звуковом генераторе поставить в положение, соответствующее минимуму напряжения, а регулятор чувствительности входа вертикального отклонения осциллографа – в положение минимальной чувствительности;

– установить луч в центре экрана осциллографа;

– установить на звуковом генераторе низкую частоту (50–300 Гц);

– плавно повышать напряжение на выходе звукового генератора до магнитного насыщения образца;

– отрегулировать вертикальное и горизонтальное усиление осциллографа так, чтобы изображение петли было развернуто почти на весь экран;

– при последующих измерениях величину горизонтального и вертикального усиления не менять для сохранения постоянных масштабов;

– зарисовать изображение петли;

– повторить измерения при большей частоте (700–900 Гц).

3. Построить основную кривую намагничивания.

При частоте, указанной преподавателем, подать на образец напряжение, соответствующее максимальной напряженности магнитного поля. Записать координаты вершин петли; изменяя горизонтальное отклонение луча уменьшением амплитуды сигналов генератора, измерять координаты вершин получаемых петель гистерезиса. Результаты измерений занести в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты измерений

Материал	$f$	$X$	$H$	$Y$	$B$	$\mu_r$
	Гц	мм	А/м	мм	Тл	о.е.

4. Выключить приборы.

5. Обработать результаты измерений.

6. Рассчитать удельные суммарные потери (Вт/кг), используя формулу

$$p = \frac{S_r \cdot h \cdot b \cdot f \cdot V}{g}, \quad (3.33)$$

где  $S_r$  – площадь петли гистерезиса, мм<sup>2</sup>;

$h$  – горизонтальный масштаб, А/м в мм;

$b$  – вертикальный масштаб, Тл/мм;

$f$  – частота, Гц;

$V$  – объем образца, м<sup>3</sup>;

$g$  – масса образца, кг.

Масштаб по горизонтали

$$h = \frac{\sqrt{2} \cdot \omega_1 \cdot U_0}{R_0 \cdot l_{cp} \cdot X}, \quad (3.34)$$

где  $l_{cp} = 2\pi r_{cp}$  – средняя длина магнитной линии образца,  $\omega_1$  – число витков первичной обмотки,  $U_0/X$  – коэффициент усиления по оси  $X$  (устанавливается на осциллографе).

Вертикальный масштаб

$$b = \frac{\sqrt{2} \cdot U_c \cdot C \cdot R_1}{\omega_2 \cdot S \cdot Y}, \quad (3.35)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода, мм<sup>2</sup>;

$\omega_2$  – число витков вторичной обмотки,  $U_c/Y$  – коэффициент усиления по оси  $Y$  (устанавливается на осциллографе).

Результаты расчетов для разных частот занести в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты измерений

	$g$	$f$	$X$	$H$	$Y$	$B$	$X_C$	$H_C$	$Y_r$	$B_r$	$S_r$	$p$
Материал	кг	Гц	мм	А/м	мм	Тл	мм	А/м	мм	Тл	мм <sup>2</sup>	Вт/кг

7. Произвести аналитическое разделение потерь на гистерезис и вихревые токи по результатам измерения удельных потерь на двух частотах, решая систему уравнений

$$p_1 = a \cdot f_1 + c \cdot f_1^2, \quad (3.36)$$

$$p_2 = a \cdot f_2 + c \cdot f_2^2, \quad (3.37)$$

где  $p_1, p_2$  – удельные потери, измеренные на частотах  $f_1$  и  $f_2$  при постоянной магнитной индукции;  $a$  и  $c$  – искомые коэффициенты.

Удельные потери на гистерезис и на вихревые токи записать как

$$p_r = a \cdot f_{раб}; \quad p_v = c \cdot f_{раб}^2; \quad f_{раб} = 50 \text{Гц}.$$

8. Используя основную кривую намагничивания, вычислить магнитную проницаемость при различных напряженностях магнитного поля и построить график.

### Содержание отчета

Отчет должен включать:

- цель работы;
- принципиальную схему установки;
- основные формулы и соотношения, используемые в работе;
- графики зависимостей  $B = f(H)$ ;  $\mu_r = f(H)$ ;
- анализ и выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Природа магнитных свойств материалов.
2. Отличие диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных материалов.
3. Объясните наличие насыщения на основной кривой намагничивания.
4. Виды потерь в ферромагнитных материалах и методы их разделения.
5. Зависимость относительной магнитной проницаемости сильномагнитных материалов от температуры, частоты и напряженности магнитного поля.
6. Отличие зависимостей индукции от напряженности магнитного поля для парамагнитного и ферромагнитного материалов.
7. Петля гистерезиса. Характерные точки.
8. Использование магнитомягких материалов. Особенности и область применения.
9. Использование магнитотвердых материалов. Особенности и область применения.
10. Объяснить методику получения петли гистерезиса и основной кривой намагничивания, используемую в данной работе.
11. Понятие начальной, максимальной, дифференциальной, динамической относительной магнитной проницаемости и абсолютной магнитной проницаемости.

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ К МОДУЛЮ 3

### Контрольное задание № 3

Определить потери мощности в голом проводе из указанного в таблице металла длиной  $l$  и сечением  $S$  при температурах провода  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  и  $+60\text{ }^\circ\text{C}$ , если величина тока в проводе равна  $I$ .

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов ( $\text{K}^{-1}$ )

$$TK_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}. \quad (3.38)$$

Согласно выводам электронной теории металлов, значения  $\alpha_\rho$  чистых металлов в твердом состоянии должны быть близки к температурному коэффициенту расширения идеальных газов, т. е.  $1:273 \approx 0,0037\text{ K}^{-1}$ . При изменении температуры в узких диапазонах на практике принимают



$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_\rho (T_2 - T_1)], \quad (3.39)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления проводникового материала при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно (при этом  $T_2 > T_1$ );

$\alpha_\rho$  – средний температурный коэффициент удельного сопротивления данного материала в диапазоне температур от  $T_1$  до  $T_2$ .

Выбор варианта контрольного задания осуществляется по таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Варианты заданий

Номер варианта	Металл	$\ell$ , м	$S$ , мм <sup>2</sup>	$I$ , А	$\rho$ , мкОм·м при +20 °С	$\alpha_\rho$
1	Медь	100	16	75	0,0172	0,0043
2	Сталь	200	20	80	0,098	0,006
3	Вольфрам	50	0,04	5	0,055	0,0046
4	Алюминий	150	70	90	0,028	0,0042
5	Медь	80	10	110	0,0172	0,0043
6	Сталь	170	15	120	0,098	0,006
7	Алюминий	120	35	150	0,028	0,0042
8	Вольфрам	70	0,06	10	0,055	0,0046
9	Медь	140	25	200	0,0172	0,0043
10	Сталь	135	35	100	0,098	0,006
11	Никель	10	0,5	20	0,073	0,0065
12	Бериллий	100	1,0	40	0,04	0,0060
13	Медь	200	20	60	0,0172	0,0043
14	Алюминий	110	10	30	0,028	0,0042
15	Вольфрам	0,7	0,1	3	0,055	0,0046
16	Сталь	90	2,5	50	0,098	0,006
17	Алюминий	120	35	150	0,028	0,0042
18	Медь	80	20	75	0,0172	0,0043
19	Сталь	30	10	80	0,098	0,006
20	Вольфрам	100	0,3	5	0,055	0,0046
21	Алюминий	90	10	90	0,028	0,0042
22	Никель	100	1,0	20	0,073	0,0065
23	Бериллий	30	1,5	40	0,04	0,0060
24	Медь	250	10	60	0,0172	0,0043
25	Алюминий	70	20	30	0,028	0,0042

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уважаемые студенты, закончив изучение теоретического материала учебного пособия «Материаловедение. Электротехнические материалы» и выполнив работы в лаборатории, вы освоили всю основную часть данной дисциплины, изучающей основные физические явления, происходящие в материалах при воздействии на них электромагнитных полей и различных факторов, а также научились определять виды электротехнических материалов и возможности их применения в основных видах электроэнергетического оборудования. Вы получили необходимую теоретическую и практическую подготовку. Производство электротехнических изделий не стоит на месте. На сегодняшний день номенклатура в этой области довольно обширна. Поэтому знать, а самое главное правильно применить такие материалы является основной задачей квалифицированного специалиста. Хорошо, если вам удастся решить ваши будущие производственные задачи с помощью полученных знаний и умений. Неплохо, если вам придется обратиться к специальной литературе или системе Internet, где вы найдете готовое решение или подсказку к решению поставленной перед вами задачи. Но не исключено, что вам самим придется ставить и решать задачи по выбору подходящих материалов для электрооборудования. Если в решении этих задач учебное пособие окажет вам какую-нибудь помощь, автор будет считать свою работу не напрасной. А пока остается только пожелать вам всяческих успехов.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Воропаев, В.В. Электроматериаловедение: методические указания к лабораторным работам / В.В. Воропаев. – Тверь: Лилия Принт, 2008. – 42 с.
2. Журавлева, Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Академия; ИРПО, 2000. – 312 с.
3. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2004. – 519 с.
4. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 1999. – 80 с.
5. Справочник по электрическим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Тимофеев, С.А. Технология конструкционных материалов и материаловедение: электротехнические материалы: учеб. пособие / С.А. Тимофеев; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2007. – 158 с.
7. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Выбор варианта расчетно-графических заданий

Номер варианта контрольных работ определяется по двум последним цифрам номера зачетки студента.

#### Определение варианта контрольной работы студента

Предпоследняя цифра номера	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	7	4	8	11	13	17	21	25	3	5
1	2	6	1	4	3	10	15	2	14	19
2	1	24	16	5	23	20	22	12	18	9
3	13	17	21	12	8	4	5	1	15	3
4	24	22	9	18	10	14	2	16	3	5
5	20	2	12	25	19	23	6	1	4	7
6	4	14	18	7	3	2	2	3	9	25
7	8	19	9	15	5	16	20	21	6	11
8	11	1	17	1	6	15	12	5	23	2
9	13	24	5	10	3	4	8	13	17	22

**Пример выбора задания:** номер зачетной книжки – 12эт052.

Шифр задания – 52. Номер варианта контрольной работы – 12.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
МОДУЛЬ 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	4
1.1 Строение вещества. Виды связи в веществе.....	4
1.2 Поляризация диэлектриков.....	8
1.2.1 Электрическое поле.....	8
1.2.2 Поляризация диэлектриков в электрическом поле.....	10
1.2.3 Основные виды поляризации диэлектриков.....	12
1.2.4 Поляризация комбинированных диэлектриков.....	14
1.2.5 Диэлектрическая проницаемость газов.....	15
1.2.6 Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков...	16
1.2.7 Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков...	17
1.3 Электропроводность диэлектриков.....	19
1.3.1 Основные понятия.....	19
1.3.2 Физическая природа электропроводности диэлектриков...	22
1.3.3 Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков.....	24
1.4 Диэлектрические потери.....	26
1.4.1 Основные понятия.....	26
1.4.2 Векторное представление синусоидальных величин.....	27
1.4.3 Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от различных факторов.....	31
1.4.4 Измерение тангенса угла диэлектрических потерь.....	34
1.5 Пробой диэлектриков.....	35
1.5.1 Основные понятия.....	35
1.5.2 Пробой газов.....	37
1.5.2.1 Процессы ионизации в газах.....	37
1.5.2.2 Механизм пробоя газов.....	39
1.5.2.3 Влияние формы электрического поля и полярности электродов на разрядное напряжение.....	40
1.5.2.4 Закон Пашена.....	42
1.5.3 Пробой жидких диэлектриков.....	43
1.5.4 Пробой твердых диэлектриков.....	46
1.6 Основные физические свойства диэлектриков.....	50
1.6.1 Влажностные свойства.....	50
1.6.2 Термические свойства.....	52
1.6.3 Механические свойства.....	53

	ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ К МОДУЛЮ 1.....	54
	Лабораторная работа № 1.....	54
	Лабораторная работа № 2.....	61
	Лабораторная работа № 3.....	67
	Лабораторная работа № 4.....	72
	РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ К МОДУЛЮ 1...	77
	Контрольное задание № 1.....	77
	МОДУЛЬ 2 ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	80
2.1	Газообразные электроизоляционные материалы.....	80
2.1.1	Воздух. Вакуум.....	80
2.1.2	Элегаз и другие высокопрочные газы.....	82
2.2	Жидкие электроизоляционные материалы.....	85
2.2.1	Минеральные масла.....	85
2.2.2	Хлорированные углеводороды.....	88
2.2.3	Кремнийорганические жидкости.....	89
2.2.4	Синтетические углеводороды.....	90
2.2.5	Жидкости, применяемые взамен трансформаторного масла.....	90
2.3	Твердые электроизоляционные материалы.....	91
2.3.1	Волокнистые материалы. Слоистый пластик.....	91
2.3.2	Электрокерамика. Стекло. Материалы на основе слюды...	95
2.3.3	Высокополимерные материалы.....	98
2.3.4	Лаки, смолы, компаунды.....	102
	РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ К МОДУЛЮ 2...	104
	Контрольное задание № 2.....	104
	МОДУЛЬ 3 ПРОВОДНИКОВЫЕ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	107
3.1	Проводниковые материалы.....	107
3.1.1	Проводниковые материалы высокой удельной проводимости.....	107
3.1.2	Сверхпроводниковые материалы.....	109
3.1.3	Высокотемпературная сверхпроводимость.....	112
3.1.4	Низкотемпературная сверхпроводимость.....	113
3.1.5	Проводниковые материалы высокой удельной проводимости.....	114
3.1.6	Проводниковые материалы высокого удельного сопротивления.....	115
3.1.7	Специальные материалы.....	116

3.2	Полупроводниковые материалы.....	118
3.3	Магнитные материалы.....	122
	ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ К МОДУЛЮ 3.....	127
	Лабораторная работа № 5.....	127
	Лабораторная работа № 6.....	134
	РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ К МОДУЛЮ 3...	143
	Контрольное задание № 3.....	143
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	145
	РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	146
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	147

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

Учебное пособие

*Василенко Александр Александрович*

*Редактор И.В. Пантелеева*

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 19.01.2018. Формат 60×90/16. Бумага тип. № 1.

Печать – ризограф. Усл. печ. л. 9,5. Тираж 100 экз. Заказ № 14

Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета  
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117