



Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Электроснабжение»

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

## **КУРС ЛЕКЦИЙ**

**для студентов специальностей**

**1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям)**

**и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2006**

УДК 621.315.6.002.3(075.8)  
ББК 31.23я73  
Э45

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 6 от 30.05.2005 г.)*

Авторы-составители: *Д. И. Зализный, Ю. Н. Колесник*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Материаловедение в машиностроении» ГГТУ  
им. П. О. Сухого *И. Н. Степанкин*

Э45 **Электротехнические материалы:** курс лекций для студентов специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» / авт.-сост.: Д. И. Зализный, Ю. Н. Колесник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 42 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 985-420-461-8.

Курс лекций содержит краткие сведения о физических процессах, протекающих в диэлектриках, проводниках, полупроводниках и магнитных материалах, применяющихся в электротехнике. Рассмотрены области применения различных электротехнических материалов в энергетике, электромашиностроении и электронике.

В помощь студентам при подготовке к зачету по курсу «Электротехнические материалы».

**УДК 621.315.6.002.3(075.8)  
ББК 31.23я73**

**ISBN 985-420-461-8**

© Зализный Д. И., Колесник Ю. Н., составление, 2006

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2006

## Тема 1. Роль электротехнических материалов в энергетике. Классификация электротехнических материалов

*Материал* – это объект, обладающий определенным составом, структурой и свойствами, предназначенный для выполнения определенных функций. Материалы могут иметь различное агрегатное состояние: твердое, жидкое, газообразное или плазменное. Функции, которые выполняют материалы, разнообразны: обеспечение протекания тока (в проводниковых материалах), сохранение определенной формы при механических нагрузках (в конструкционных материалах), обеспечение изоляции (в диэлектрических материалах), превращение электрической энергии в тепловую (в резистивных материалах). Обычно материал выполняет несколько функций. Например, диэлектрик обязательно испытывает какие-то механические нагрузки, то есть является конструкционным материалом.

*Материаловедение* – наука, занимающаяся изучением состава, структуры, свойств материалов, поведением материалов при различных воздействиях: тепловых, электрических, магнитных и т. д., а также при сочетании этих воздействий.

*Электротехническое материаловедение* – это раздел материаловедения, который занимается материалами для электротехники и энергетики, т. е. материалами, обладающими специфическими свойствами, необходимыми для конструирования, производства и эксплуатации электротехнического оборудования.

Материалы играют определяющую роль в энергетике. Например, изоляторы высоковольтных линий. Исторически первыми придумали изоляторы из фарфора. Технология их изготовления достаточно сложна, капризна. Изоляторы получаются довольно громоздкими и тяжелыми. Научились работать со стеклом – появились стеклянные изоляторы. Они легче, дешевле, их диагностика несколько проще. И, наконец, последние изобретения – это изоляторы из кремнийорганической резины. Первые изоляторы из резины были не очень удачны. На их поверхности с течением времени образовывались микротрещины, в которых набивалась грязь, образовывались проводящие треки, затем изоляторы пробивались. Подробное изучение поведения изоляторов в электрическом поле проводов высоковольтных линий (ВЛ) в условиях внешних атмосферных воздействий позволило подобрать ряд добавок, улучшивших атмосферостойкость, стойкость по отношению к загрязнениям и действию электрических разрядов. В ре-

зультате сейчас создан целый класс легких, прочных изоляторов на различные уровни воздействующего напряжения.

Для сравнения, вес подвесных изоляторов для ВЛ 1150 кВ сопоставим с весом проводов в пролете между опорами и составляет несколько тонн. Это вынуждает ставить дополнительные параллельные гирлянды изоляторов, что увеличивает нагрузку на опору. Требуется использовать более прочные, а значит более массивные опоры. Это увеличивает материалоемкость, большой вес опор значительно поднимает расходы на монтаж. Для справки, стоимость монтажа составляет до 70 % стоимости строительства линии электропередач. На примере видно, как один элемент конструкции влияет на конструкцию в целом.

Таким образом, электротехнические материалы (ЭТМ) являются одним из определяющих факторов технико-экономических показателей любой системы электроснабжения.

Основные материалы, которые используются в энергетике, можно разделить на несколько классов – это проводниковые материалы, магнитные материалы и диэлектрические материалы. Общим для них является то, что они эксплуатируются в условиях действия напряжения, а значит и электрического поля.

**Проводниковыми** называют материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная, по сравнению с другими электротехническими материалами, электропроводность. Их применение в технике обусловлено в основном этим свойством, определяющим высокую удельную электрическую проводимость при нормальной температуре.

**Полупроводниковыми** называют материалы, которые являются по своей удельной проводимости промежуточными между проводниковыми и диэлектрическими материалами и отличительным свойством которых является исключительно сильная зависимость удельной проводимости от концентрации и вида примесей или других дефектов, а также в большинстве случаев от внешних энергетических воздействий (температуры, освещенности и т. п.).

**Диэлектрическими** называют материалы, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля. Реальный (технический) диэлектрик тем более приближается к идеальному, чем меньше его удельная проводимость и чем слабее у него выражены замедленные механизмы поляризации, связанные с рассеиванием электрической энергии и выделением тепла.

**Магнитными** называют материалы, предназначенные для работы в магнитном поле при непосредственном взаимодействии с этим полем.

**Композиционные материалы** – это материалы, состоящие из нескольких компонент, выполняющих разные функции, причем между компонентами существуют границы раздела.

## Тема 2. Особенности строения твердых тел. Природа электропроводности твердых тел

Большинство ЭТМ представляют собой твердые тела.

**Твердыми** называют тела, отличающиеся постоянством формы и объема. Твердые тела подразделяются на кристаллические и аморфные.

**Кристаллические** – твердые тела, имеющие правильное периодическое расположение составляющих их частиц – *кристаллическую решетку* (рис. 1).



Рис. 1. Схематическое двухмерное изображение решетки кристалла

**Монокристаллы** имеют форму правильных многогранников, обусловленную их химическим составом. Большинство твердых тел – поликристаллов – имеют мелкокристаллическую структуру, то есть состоят из большого числа сросшихся мелких, хаотически расположенных кристаллов (кристаллических зерен, кристаллитов).

Кристаллы имеют *симметрию*, состоящую в том, что любому заданному направлению в кристалле соответствуют одно или несколько направлений, которые в отношении рассматриваемых свойств являются совершенно одинаковыми.

В *металлах* узлы кристаллической решетки заняты положительными ионами, образовавшимися при отщеплении от атомов валентных электронов.

В *ионных кристаллах* в узлах кристаллической решетки правильно чередуются положительные и отрицательные ионы.

В *валентных кристаллах* узлы кристаллической решетки заняты нейтральными атомами.

Идеальных кристаллических решеток не существует. Все они обладают нарушением периодичности структуры – *дефектами* (рис. 2).

Дефекты кристаллической решетки приводят к рассеянию электронных волн де Бройля, в результате чего появляется сопротивление электрическому току.

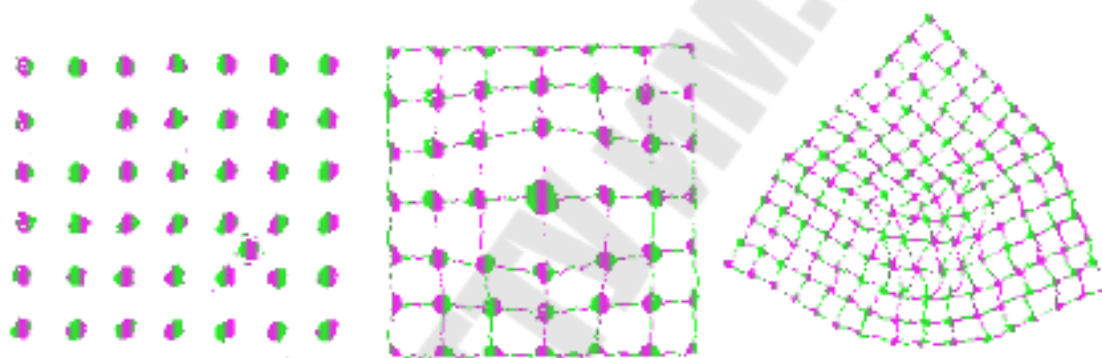


Рис. 2. Дефекты кристаллической решетки

Различие между проводниками, полупроводниками и диэлектриками наиболее наглядно можно показать с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердых тел.

Исследование спектров излучения различных веществ в газообразном состоянии, когда атомы расположены относительно друг друга на больших расстояниях, показывает, что для атомов каждого вещества характерны вполне определенные спектральные линии. Это говорит о наличии определенных *энергетических состояний (уровней)* для разных атомов.

Энергетические диаграммы диэлектриков, полупроводников и проводников имеют разную ширину запрещенной зоны (рис. 3).

Зоны энергии в кристаллах подразделяются на валентные зоны и зоны проводимости.

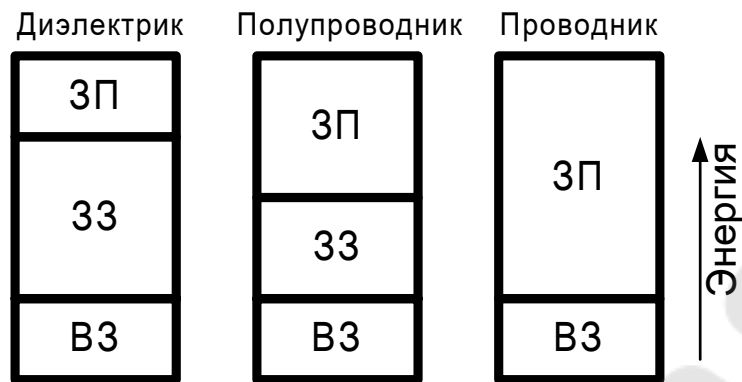


Рис. 3. Энергетические диаграммы диэлектрика:  
 ЗП – зона проводимости; ЗЗ – запрещенная зона; ВЗ – валентная зона

**Валентные зоны** – это полностью занятые электронами зоны, образованные из энергетических уровней электронов внутренних оболочек свободных атомов.

**Зоны проводимости** – это частично или целиком незаполненные зоны, уровни энергии в которых соответствуют энергиям внешних электронов изолированных атомов или ионов.

Переход электрона из одной зоны в другую осуществляется путем поглощения или отдачи энергии, достаточной для перехода электрона через запрещенную зону.

В металлах даже слабое электрическое поле способно сообщить электронам достаточный импульс, чтобы вызвать их переход в зону проводимости. По этой причине металлы являются хорошими проводниками электрического тока.

У диэлектриков запрещенная зона настолько велика, что электронная электропроводность не играет в них определяющей роли. Поэтому диэлектрики обладают очень высоким электрическим сопротивлением.

### Тема 3. Поляризация диэлектриков и диэлектрическая проницаемость

**Поляризацией диэлектрика** называют возникновение в нем при внесении во внешнее электрическое поле макроскопического собственного электрического поля, обусловленного смещением заряженных частиц, входящих в состав молекул диэлектрика. Диэлектрик, в котором возникло такое поле, называется *поляризованным*.

Поляризованный диэлектрик можно представить как конденсатор с емкостью  $C$  (рис. 4). В таком конденсаторе электрическое поле

$\vec{E}_n$ , созданное поляризационными зарядами, направлено противоположно внешнему полю  $\vec{E}$ , поляризующему диэлектрик.

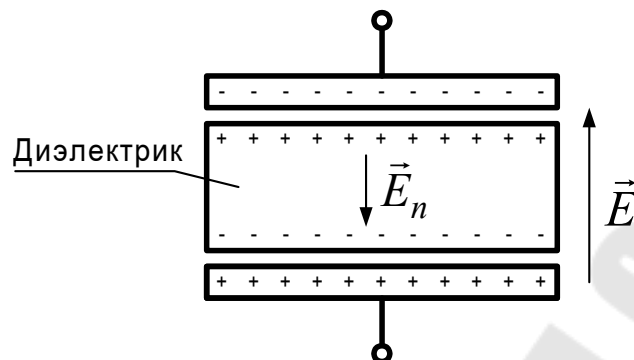


Рис. 4. Диэлектрик в электрическом поле

Емкость  $C$  имеет две основные составляющие:

$$C = C_0 + C_D,$$

где  $C_0$  – емкость конденсатора, у которого между обкладками находится вакуум;

$C_D$  – емкость, обусловленная поляризацией диэлектрика, находящегося между пластинами.

Рассмотрим отношение:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} = \frac{C_0 + C_D}{C_0} = 1 + \frac{C_D}{C_0}.$$

Величина  $\varepsilon$  называется *относительной диэлектрической проницаемостью* ( $\varepsilon = 1$  для вакуума и  $\varepsilon > 1$  для реального диэлектрика). Данная величина характеризует способность различных материалов поляризоваться в электрическом поле.

Существует два основных вида поляризации диэлектриков:

а) поляризация под воздействием электрического поля практически мгновенная, вполне упругая, без рассеяния энергии, т. е. без выделения теплоты;

б) поляризация, совершаемая не мгновенно, а нарастающая и убывающая замедленно и сопровождаемая рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. его нагреванием. Такой вид поляризации называют *релаксационной поляризацией*.

К первому виду поляризации относятся *электронная и ионная*, остальные механизмы принадлежат к *релаксационной* поляризации.



**Электронная поляризация** представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около  $10^{-15}$  с). Диэлектрическая проницаемость вещества с чисто электронной поляризацией численно равна квадрату показателя преломления света *n*. Смещение и деформация электронных орбит атомов или ионов не зависит от температуры, однако электронная поляризация вещества уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема. Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерей энергии.

**Ионная поляризация** характерна для твердых тел с ионным строением и обуславливается смещением упругосвязанных ионов. С повышением температуры она усиливается в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, из-за увеличения расстояния между ними при тепловом расширении. Время установления ионной поляризации около  $10^{-13}$  с.

**Дипольно-релаксационная (дипольная) поляризация** отличается от электронной и ионной тем, что она связана с тепловым движением частиц. Дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации. Дипольная поляризация возможна, если молекулярные силы не препятствуют диполям ориентироваться вдоль поля. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза.

Промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных полей диполей после его снятия уменьшится вследствие теплового движения в 2,7 раза по сравнению с первоначальным значением, называют *временем релаксации*.

**Ионно-релаксационная поляризация** наблюдается в неорганических стеклах и в некоторых ионных кристаллических неорганических веществах с неплотной упаковкой ионов. В этом случае слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля среди хаотического теплового движения смещаются в направлении поля. После снятия электрического поля ионно-релаксационная поляризация постепенно ослабевает по экспоненциальному закону, а с повышением температуры – заметно усиливается.

**Электронно-релаксационная поляризация** возникает вследствие возбуждения тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок. Такая поляризация характерна для диэлектриков с высоким показателем преломления, большим внутренним полем

и электронной электропроводностью. Например, диоксид титана, загрязненный примесями. Следует отметить высокое значение диэлектрической проницаемости, которое может быть при электронно-релаксационной поляризации.

**Миграционная поляризация** является дополнительным механизмом поляризации, проявляющаяся в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях и наличии примесей. Эта поляризация проявляется при низких частотах и связана со значительным рассеянием электрической энергии. Причинами такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т. д.

#### Тема 4. Электропроводность диэлектриков

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления равновесного состояния протекают во времени, создавая токи смещения в диэлектриках. Токи смещения упругосвязанных зарядов при электронной и ионной поляризациях столь кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые у большого числа технических диэлектриков, называют *абсорбционными токами*. При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения. При переменном напряжении они протекают в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле. Таким образом, ток абсорбции – это емкостной ток.

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению слабых по величине *сквозных токов*. Эти токи имеют место как в постоянном, так и в переменном электрическом поле. Сопротивление диэлектрика сквозному току называют *сопротивлением изоляции*.

Ток утечки в техническом диэлектрике представляет собой сумму сквозного тока и тока абсорбции:

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{ск}} + I_{\text{аб}}.$$

Каждый диэлектрик может быть представлен в виде электрической схемы замещения (рис. 5). Переходной процесс при приложении напряжения  $U$  приведен на рис. 6. Ток утечки достигает своего установившегося значения через 60 с после приложения напряжения.

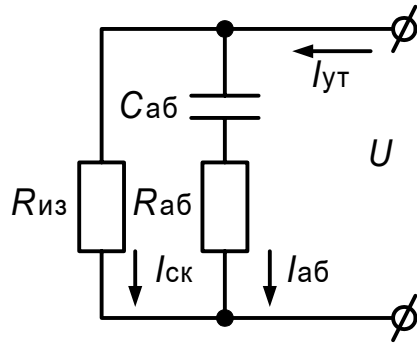


Рис. 5. Электрическая схема замещения диэлектрика:  
 $R_{из}$  – сопротивление изоляции;  $R_{аб}$ ,  $C_{аб}$  – соответственно абсорбционные сопротивление и емкость;  
 $U$  – приложенное напряжение

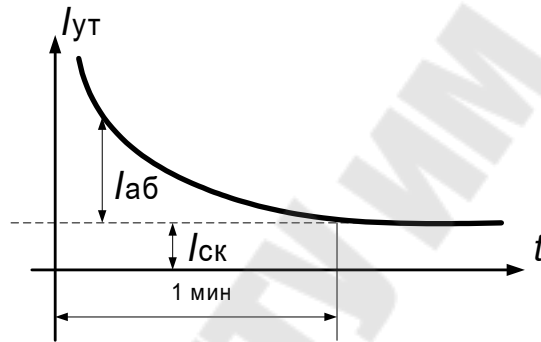


Рис. 6. Процесс изменения тока утечки диэлектрика при приложении напряжения

Для твердых диэлектриков сквозной ток имеет две составляющие:

$$I_{ск} = I_s + I_v,$$

где  $I_s$  – поверхностный ток утечки;  $I_v$  – объемный ток утечки.

Сопротивление изоляции диэлектрика может быть представлено как параллельное соединение поверхностного  $R_s$  и объемного  $R_v$  сопротивлений, как показано на рис. 7.

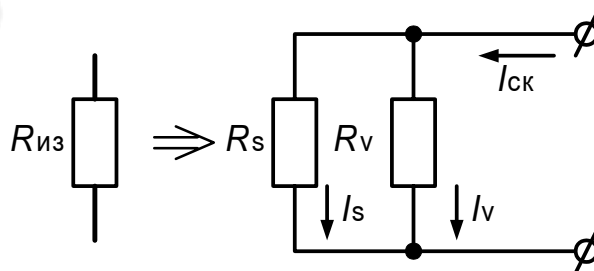


Рис. 7. Составляющие сопротивления изоляции диэлектрика

$$R_{\text{из}} = \frac{R_s \cdot R_v}{R_s + R_v}$$

Для сравнительной оценки объемной и поверхностной проводимости различных материалов пользуются значениями *удельного объемного сопротивления*  $\rho_v$  и *удельного поверхностного сопротивления*  $\rho_s$ .

В системе СИ удельное объемное сопротивление  $\rho_v$  равно объемному сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала (если ток проходит сквозь куб от одной его грани к противоположной), умноженному на 1 м:

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h}, \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где  $S$  – площадь электрода;  $h$  – толщина образца.

Удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$  равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через квадрат от одной его стороны к противоположной:

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{l}, \text{ Ом},$$

где  $d$  – ширина электродов;  $l$  – расстояние между электродами.

Объемная электропроводность твердых диэлектриков обусловлена как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей. Электронная электропроводность становится заметной в условиях сильных электрических полей.

Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков обусловлена присутствием влаги или загрязнений на поверхности диэлектрика. Достаточно тончайшего слоя влаги, чтобы было обнаружено значительное снижение значения  $\rho_s$ .

## Тема 5. Диэлектрические потери

*Диэлектрическими потерями* называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Рассмотрим упрощенные варианты схемы замещения диэлектрика, приведенной на рис. 5. В результате получим *параллельную схему замещения* (рис. 8, а) и *последовательную схему замещения* (рис. 9, а).

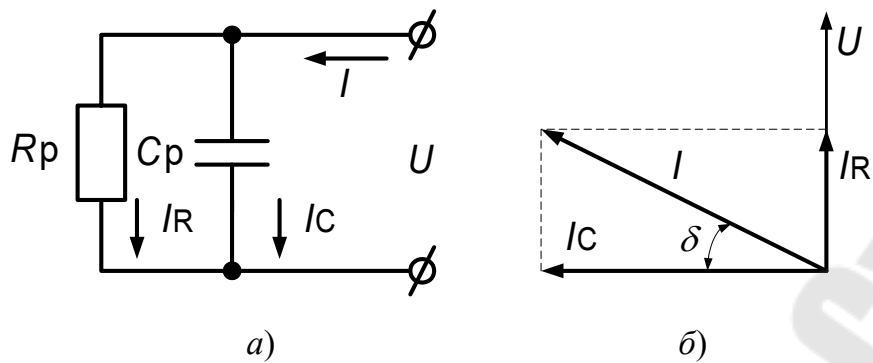


Рис. 8. Параллельная схема замещения диэлектрика (а) и векторная диаграмма параллельной схемы замещения (б)

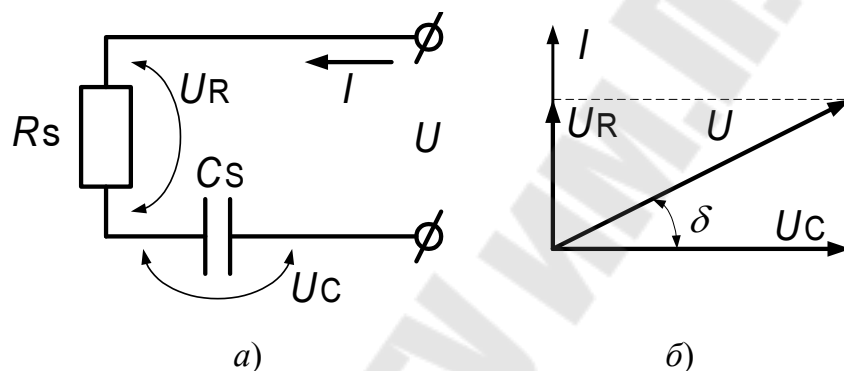


Рис. 9. Последовательная схема замещения диэлектрика (а) и векторная диаграмма последовательной схемы замещения (б)

Данные схемы замещения приняты лишь условно. Они не дают объяснения механизма диэлектрических потерь.

В инженерной практике для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используют *угол диэлектрических потерь*  $\delta$  – это угол, дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи (рис. 8, б и рис. 9, б). Обычно принято использовать значение *тангенса* угла диэлектрических потерь:  $\operatorname{tg}\delta$ .

Запишем расчетные соотношения для диэлектрических потерь. Для параллельной схемы замещения:

$$P = U \cdot I_R = U^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot \operatorname{tg}\delta.$$

Для последовательной схемы замещения:

$$P = U_R \cdot I = \frac{U^2 \cdot \omega \cdot C_s \cdot \operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{tg}^2\delta}.$$

На основе данных соотношений можно сделать следующие выводы:

- 1) чем ниже значение  $\operatorname{tg}\delta$ , тем меньше потери электроэнергии в диэлектрике;
- 2) в высоковольтных установках предъявляются особые требования к значению  $\operatorname{tg}\delta$ , так как потери пропорциональны квадрату приложенного напряжения;
- 3) в высокочастотных установках также повышены требования к значению  $\operatorname{tg}\delta$ .

Существует три основных вида диэлектрических потерь: поляризационные потери, изоляционные потери и ионизационные потери.

*Поляризационные потери* обусловлены расходом энергии на перемещение частиц в твердом или жидком диэлектрике в результате его поляризации. Этот вид потерь имеет место только в переменном электрическом поле.

*Изоляционные потери* обусловлены наличием сквозного тока и обнаруживаются в твердых или жидких диэлектриках, имеющих заметную объемную или поверхностную проводимость. Этот вид потерь наблюдается как в переменном, так и в постоянном электрическом поле.

*Ионизационные потери* свойственны газообразным диэлектрикам и проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значение, соответствующее началу ионизации газа. Потери энергии в газе возникают из-за протекания тока, обусловленного наличием свободных электронов, появившихся в процессе ионизации газа.

## Тема 6. Электрический пробой диэлектриков

*Электрический пробой* – это нарушение электрической прочности диэлектрика под действием электрического поля.

Напряженность поля, при которой происходит пробой, называется *электрической прочностью* диэлектрика и рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \text{ МВ/м; кВ/мм,}$$

где  $U_{\text{пр}}$  – напряжение, при котором произошел пробой диэлектрика;  
 $h$  – толщина диэлектрика в месте пробоя.

Существует три основных вида пробоя *твердых* диэлектриков: электронный пробой, электротепловой пробой, электрохимический пробой.

В случае *электронного пробоя*, переменное электрическое поле вызывает упругие колебания кристаллической решетки диэлектрика, то есть приводит к деформации электронных облаков атомов. При достижении некоторого критического напряжения, электроны, находящиеся на внешних энергетических уровнях, отрываются от атомов и становятся свободными. Появление большого количества свободных электронов приводит к резкому увеличению тока через диэлектрик и его разрушению из-за значительного нагрева, вызванного диэлектрическими потерями. Электронный пробой протекает практически мгновенно, так как все процессы носят лавинообразный характер.

В случае *электротеплового пробоя* нагрев диэлектрика из-за диэлектрических потерь приводит к дополнительным колебаниям кристаллической решетки. При достижении некоторой критической температуры может возникнуть *электронный* пробой. Если напряженность поля не достаточно высока для возникновения электронного пробоя, а нагрев диэлектрика возрастает – это может привести к расплавлению и обугливанию диэлектрика.

*Электрохимический пробой* – самый медленный из видов пробоя. С течением времени под воздействием температуры и влажности происходит *электрохимическое старение диэлектрика* – необратимое уменьшение сопротивления изоляции, то есть потеря электрической прочности, и, как следствие, возникновение электронного или электротеплового пробоя при более низких значениях пробивного напряжения. Основным механизмом старения диэлектриков – воздействие частичных разрядов. Частичный разряд (ЧР) – это локальный лавинный разряд в газовой поре диэлектрика. Каждый разряд оказывает слабое воздействие на диэлектрик. Интенсивность ЧР зависит от напряженности поля. Однако разряды обычно возникают на каждом полупериоде синусоидального напряжения, поэтому с течением времени их действие нарастает. Это ведет к постепенному разложению материала, росту давления в поре и к зарождению *дендрита* – древовидного образования в теле диэлектрика. Дендрит имеет повышенную проводимость и приводит к прогрессирующему разрушению диэлектрика.

Однажды пробитый твердый диэлектрик не может эксплуатироваться в дальнейшем. Пробой твердой изоляции в электрической машине, аппарате, кабеле и т. д. означает аварию, выводящую данное устройство из строя и требующую ремонта или замены устройства.

Пробой *жидких* диэлектриков обусловлен имеющимися в них примесями. Самым значительным фактором, снижающим электрическую прочность жидких диэлектриков, является влага. Благодаря подвижности частиц, жидкий диэлектрик после пробоя восстанавливает свою электрическую прочность по прошествии некоторого времени.

Пробой *газообразных* диэлектриков обусловлен ионизацией газа во внешнем поле. При этом вначале возникает автоионизация, а затем ударная ионизация, термоионизация и фотоионизация, приводящие к появлению электронных лавин и стримера.

**Автоионизация** – это вырывание электрона из молекулы за счет действия сильного электрического поля.

**Ударная ионизация** – это увеличение числа электронов и ионов в разрядном промежутке за счет столкновения электронов с повышенной энергией с нейтральными молекулами.

**Термоионизация** – это появление свободных электронов и ионов за счет тепловой энергии.

**Фотоионизация** – это выбивание электронов фотонами при энергии фотона не меньше чем энергия ионизации.

**Электронная лавина** – это экспоненциальный рост количества носителей заряда в промежутке от катода к аноду за счет ударной ионизации молекул электронами.

**Стример** – это явление распространения с высокой скоростью в разрядном промежутке электропроводящего и светящегося плазменного канала.

После пробоя газообразный диэлектрик практически мгновенно восстанавливает свою электрическую прочность.

Электрическая прочность воздуха зависит от давления (рис. 10).

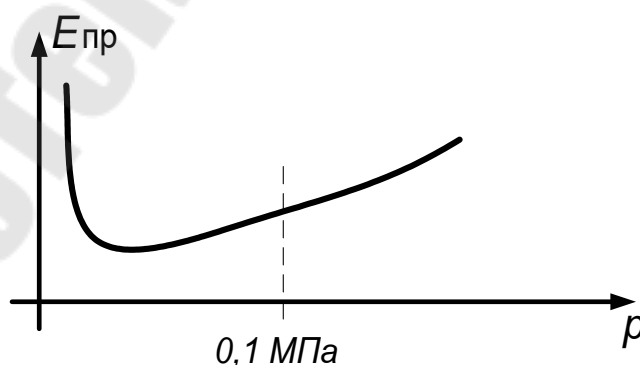


Рис. 10. Зависимость электрической прочности воздуха от давления



Явление повышения электрической прочности воздуха при низких давлениях используется в вакуумных выключателях. Газы при больших давлениях, где также имеет место возрастание их электрической прочности, применяются в качестве изоляции для высоковольтной аппаратуры, в производстве кабелей и конденсаторов высокого напряжения.

## Тема 7. Физико-химические и механические свойства диэлектриков

**Гигроскопичность** – способность диэлектриков впитывать в себя влагу из окружающей среды. Большинство изоляционных материалов гигроскопичны. Изоляция накапливает влагу с течением времени и теряет свои изоляционные свойства.

**Влагопроницаемость** – способность материала пропускать сквозь себя пары воды.

Любой образец материала через некоторое время приобретает влажностное равновесие с окружающей средой. Если влажность окружающей среды выше, чем влажность диэлектрика, то происходит *процесс увлажнения*. Если же влажность окружающей среды ниже – *процесс сушки*.

**Нагревостойкость** – способность электрической изоляции выдерживать повышенную температуру без существенного ухудшения изоляционных и механических свойств.

Воздействие температуры приводит к *тепловому старению* электрической изоляции, проявляющемуся, прежде всего, в снижении механических характеристик изоляции. Относительный тепловой износ изоляции может быть рассчитан по формуле Монтзингера:

$$F = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T 2^{\frac{\theta(t) - \theta_{\text{ном}}}{\Delta\theta_{\text{ном}}}} dt,$$

где  $T$  – длительность работы изоляции;  $\theta_{\text{ном}}$  – номинальная рабочая температура изоляции;  $\Delta\theta_{\text{ном}}$  – параметр, характеризующий скорость теплового износа изоляции;  $\theta(t)$  – временная зависимость температуры изоляции.

Относительный тепловой износ изоляции является величиной безразмерной и равен единице, если  $\theta(t) = \theta_{\text{ном}}$ .

Для изоляции силовых трансформаторов принято *шестиградусное правило*: при увеличении рабочей температуры на каждые 6 °С, тепловой износ изоляции увеличивается в два раза, то есть  $\Delta\theta_{\text{НОМ}} = 6^\circ\text{С}$ . Аналогично для остальных электрических машин принимают *восьмиградусное правило*.

Срок службы изоляции может быть рассчитан по формуле:

$$E = \frac{T_{\text{НОМ}}}{F},$$

где  $T_{\text{НОМ}}$  – номинальный срок службы изоляции, устанавливаемый заводом-изготовителем.

В зависимости от значения величины номинальной рабочей температуры  $\theta_{\text{НОМ}}$ , нормируются *классы нагревостойкости* изоляции, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

#### Классы нагревостойкости изоляции

Класс	<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
$\theta_{\text{НОМ}}, ^\circ\text{С}$	90	105	120	130	155	180	>180

На сегодняшний день классы *Y*, *A* и *E* считаются устаревшими.

**Теплопроводность** – способность изоляции отводить тепло от проводников и магнитопроводов в окружающую среду.

**Растворимость** – способность диэлектрика переходить в раствор при контакте с жидким диэлектриком.

**Химическая стойкость** – способность изоляционных материалов надежно работать в агрессивных средах: при воздействии окислителей, радиации, кислот и т. д.

К *механическим* характеристикам твердых диэлектриков относят прочность при растяжении, сжатии и изгибе. При работе в электроустановке диэлектрик может подвергаться как одному, так и нескольким видам механических нагрузок.

**Хрупкость** – способность твердого диэлектрика разрушаться без заметной пластической деформации.

**Вязкость** – свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

## Тема 8. Электроизоляционные полимеры

**Полимерами** называют высокомолекулярные соединения, макромолекулы которых состоят из большого числа повторяющихся звеньев, образованных исходными мономерами.

**Степень полимеризации** – число молекул мономера, объединившихся в одну молекулу полимера. Например, *полистирол* имеет степень полимеризации около 6000 (рис. 11), а *полиэтилен* – 28500.

Молекулы-полимеры образуются благодаря разрыву двойных химических связей молекул-мономеров.

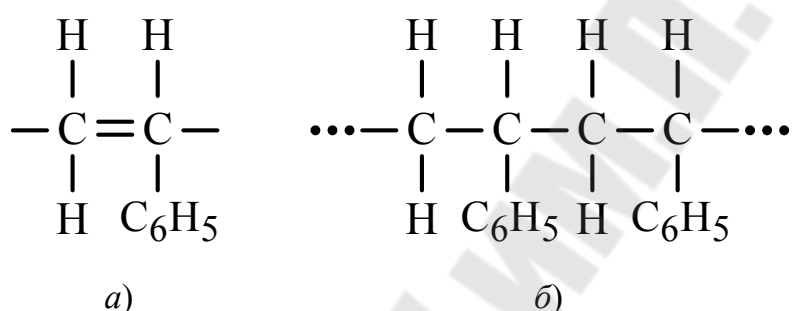


Рис. 11. Молекула стирола-мономера (а) и молекула полистирола (б)

По своему строению полимеры могут быть линейными и пространственными.

**Линейные полимеры** гибки, эластичны и легко растворимы. Линейная структура макромолекул способствует получению полимерных волокон, каучуков, пленок.

**Пространственные полимеры** обладают большей жесткостью, чем линейные, и их размягчение происходит при очень высоких температурах. Пространственные полимеры трудно растворимы.

**Термопластичными** называют полимеры, способные при многократных нагревах и охлаждениях размягчаться и затвердевать.

**Терморезистивные** полимеры при нагреве претерпевают необратимые изменения свойств и затвердевают, приобретая значительную механическую прочность и твердость.

Полимеры имеют очень большое значение в производстве многих изделий электротехнической, электронной, радиотехнической и других отраслях промышленности. Они применяются в качестве отдельных компонентов при изготовлении электрической изоляции или непосредственно.

В табл. 2 приведены некоторые распространенные полимеры и области их применения.

*Кремнийорганические полимеры* – высокомолекулярные элементоорганические соединения, содержащие атомы кремния. Достоинством таких материалов является их надежная работа при температурах от  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Например, *кремнийорганическая резина*, применяющаяся для изготовления высоковольтных изоляторов.

К электроизоляционным полимерам относят и *природные смолы*, такие как *шеллак, канифоль, каучук*.

Таблица 2

### Полимеры и области их применения

Материал	Назначение
Полипропилен	Кабельная изоляция
Поливинилхлорид	Изоляция защитных оболочек кабельных изделий, изоляция проводов, в качестве дугогасящего материала в разрядниках
Фторопласт-4	Изоляция проводов
Полиметилметакрилат (органическое стекло)	Изоляция в приборах, дугогасящий изолятор
Полистирол	Изоляция в высокочастотной аппаратуре
Капрон	Лакоткани и изоляция обмоточных проводов
Полиуретан	Лаки, эмали, компаунды, каучуки, клеи, пленки

## Тема 9. Волокнистые электроизоляционные материалы

*Волокнистыми* называют материалы, состоящие из частиц удлиненной формы – волокон. К ним относят дерево, бумагу, картон, фибру, текстильные материалы, синтетические волокна, стеклоткани.

Волокнистые материалы имеют высокую электрическую прочность и относительно невысокую стоимость. Однако они гигроскопичны и имеют низкий класс нагревостойкости: в непропитанном состоянии – класс *У*, в пропитанном состоянии – класс *А*.

Одним из первых электроизоляционных материалов, применявшихся в электротехнике, является *дерево*. В непропитанном состоянии древесина обладает очень низкими и нестабильными изоляционными свойствами. Поэтому она применяется в качестве электроизоляционного или конструктивно-изоляционного материала только в пропитан-

ном состоянии. В качестве пропитывающих веществ используют парафин, олифу, нефтяное масло, смолы. Однако пропитка не устраняет полностью гигроскопичность древесины, в связи с чем для улучшения влагостойкости детали из древесины покрывают изоляционным лаком или олифой с последующим запеканием при высокой температуре.

На сегодняшний день наибольшее применение имеют следующие породы дерева: бук, береза, дуб, ольха, клен. Древесина, как правило, используется для изготовления изолирующих штанг, различных опор и крепежных деталей.

При изготовлении высоковольтных конденсаторов используют *конденсаторную бумагу* – высококачественную тонкую (порядка 10 мкм) бумагу с хорошими изоляционными свойствами ( $\text{tg}\delta \approx 10 \cdot 10^{-4}$ ).

В кабельной технике применяют *кабельную бумагу* в качестве изоляции силовых высоковольтных кабелей высокого и низкого напряжений (толщина 0,1 мм;  $\text{tg}\delta \approx 3 \cdot 10^{-3}$ ).

*Кабельная полупроводящая бумага* применяется для экранирования изоляции силовых высоковольтных кабелей. Слой лент этой бумаги накладывается поверх токопроводящей жилы и поверх изоляции кабелей с напряжением 20 кВ и выше.

*Бумага электротехническая общего назначения* применяется для межслойной (межвитковой) изоляции обмоток трансформаторов, пускорегулирующей аппаратуры, изготовления жгутов для межфазовых пустот в силовых кабелях с бумажной пропитанной изоляцией.

*Бумаги из синтетических волокон* обладают меньшей гигроскопичностью с улучшенными изоляционными свойствами по сравнению с целлюлозным волокном. Такие бумаги применяют в качестве изоляции в электрических машинах.

*Картон* отличается от бумаги большей толщиной. Картон используют в пропитанном состоянии в качестве межобмоточной и межфазовой изоляции в трансформаторостроении.

*Фибра* – это многослойный пергаментированный картон. Фибру используют в качестве изоляционного и дугогасящего материала. При воздействии электрической дуги фибра разлагается, выделяя большое количество газов, способствующих гашению дуги. В связи с этим фибровые трубки применяются для изготовления «стреляющих» разрядников.

*Органический текстиль* применяется в качестве защитных покрытий кабелей и в изоляции электрических машин. Органический текстиль включает: материалы из натуральных волокон, материалы из искусственных волокон и материалы из синтетических волокон.

*Материалы из натуральных волокон* бывают следующих разновидностей: хлопчатобумажная пряжа, кабельная пряжа, хлопчатобумажные изоляционные ленты, изоляционный шелк. Данные материалы применяются в качестве верхних защитных покровов изоляции.

*Материалы из искусственных волокон* бывают следующих разновидностей: вискозный шелк, ацетатный шелк. Ткани из этих волокон прочны и эластичны.

*Материалы из синтетических волокон* бывают следующих разновидностей: полиамидное волокно (капрон), лавсановый шелк. Данные материалы применяются для изоляции обмоточных проводов.

*Пропитанные волокнистые материалы* получают путем пропитки в электроизоляционных лаках или составах различных материалов из натуральных органических волокон. Сочетание высокой механической прочности пропитываемой ткани с высокими изоляционными свойствами пропитывающих составов позволяет получать материалы, обладающие комплексом свойств, обусловившим их широкое применение для целей электрической изоляции.

К пропитанным волокнистым материалам относят: лакоткани, лакобумаги, лакированные трубки и изоляционные ленты (изоленды).

*Лакоткани* широко применяют для изоляции в электрических машинах, аппаратах, кабельных изделиях в виде обмоток, оберток, прокладок и т. д. Разновидностью лакотканей является *стеклоткань*, у которой в качестве основы используется стекловолокно. Недостаток лакотканей – повышенное тепловое старение.

При пропитке бумаги лаками получают *лакобумаги*, которые дешевле лакотканей и в ряде случаев являются их альтернативой. Недостаток лакобумаг – низкая механическая прочность.

*Лакированные трубки* используются в качестве уплотнителей и дополнительной изоляции.

*Изоляционные ленты* бывают односторонние и двухсторонние, в зависимости от наличия резиновой смеси на одной или двух сторонах.

## **Тема 10. Пленочные и слюдяные электроизоляционные материалы**

*Органические полимерные пленки* представляют собой тонкие и гибкие материалы, которые могут быть получены в виде длинных, намотанных в рулоны лент различной ширины. Благодаря высоким изоляционным свойствам, пленки представляют особый интерес для электроизоляционной техники в электромашиностроении, конденсаторостроении, производстве кабельных изделий. Полимерные пленки

являются важным элементом изоляции низковольтных электрических машин (до 1000 В), где они используются в качестве витковой и корпусной изоляции обмоток. Применение полимерных пленок в кабельной технике позволяет создавать обмоточные и монтажные провода, а также силовые кабели с высокими электрическими и механическими характеристиками при относительно малой толщине изоляции. Пленочные материалы используются также в качестве диэлектрика силовых конденсаторов.

**Слюда** – это природный минеральный электроизоляционный материал. Слюда обладает высокой электрической прочностью, нагревостойкостью, влагостойкостью, механической прочностью и гибкостью. Поэтому она применяется в качестве изоляции электрических машин высоких напряжений и больших мощностей.

**Миканиты** – это листовые или рулонные материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы. Миканиты используются в качестве коллекторной изоляции и различных изолирующих прокладок в электрических машинах.

**Микалента** представляет собой композиционный материал из одного слоя пластинок слюды, склеенных при помощи лака между собой. В качестве подложки используется стеклоткань, покрывающая слюду с обеих сторон.

Из слюды, полученной синтетическим способом, изготавливают *слюдяную бумагу*. Существует два основных типа изоляционных материалов, изготавливаемых из слюдяных бумаг: *слюдиниты* и *слюдопласты*.

*Слюдиниты* применяются в изоляции электрических машин нагревостойкого исполнения (класс нагревостойкости Н) в качестве пазовой изоляции и межвитковых прокладок.

Область применения *слюдопластов* включает фасонные изделия электрических машин: коллекторные манжеты, гильзы, трубки, изоляционные цилиндры класса нагревостойкости *F*.

## Тема 11. Каучуки и резины

**Натуральный каучук** является продуктом, содержащимся в млечном соке (латексе), который извлекают из стволов каучуконосных деревьев, растущих в тропических странах.

**Синтетические каучуки** являются продуктами различных процессов полимеризации изопрена, бутадиена и других органических соединений.

**Резина** представляет собой вулканизованную многокомпонентную смесь на основе каучуков. Резина применяется, в первую очередь, в кабельных изделиях.

**Кабельные резины** делятся на два основных класса: изоляционные и шланговые.

**Изоляционные резины** служат для изоляции токопроводящих жил. Резиновая смесь накладывается на жилу в виде трубки определенной толщины и в таком виде вулканизуется.

**Шланговые резины** применяются в качестве защитной оболочки для переносных кабелей и проводов, так как таким изделиям необходима максимальная гибкость.

**Полупроводящие резины** применяются для экранирования гибких кабелей.

**Починочные резины** используются при сращивании и ремонте кабелей.

Применение резин в кабельных изделиях позволяет придать им нужную гибкость, влагостойкость, маслостойкость, способность не распространять горение путем применения в резиновых смесях современных каучуков и других ингредиентов.

## Тема 12. Электроизоляционные стекла

Стеклообразное состояние является разновидностью аморфного. *Стеклами* называют аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$  и других химических соединений.

По твердости, хрупкости и упругости стекло сходно с типичными твердыми телами, но отличается от них характерным для жидкостей отсутствием симметрии в кристаллической решетке.

В табл. 3 приведены наиболее распространенные типы стекол, области их применения и требования к их свойствам.

Таблица 3

Типы электроизоляционных стекол и области их применения

Тип стекла по назначению	Область применения	Требуемые свойства
Конденсаторные стекла	Диэлектрик конденсаторов	Повышенная диэлектрическая проницаемость, малый $\text{tg}\delta$
Установочные стекла	Установочные детали, изоляторы, платы	Высокие изоляционные свойства при высокой термостойкости и химостойкости



Тип стекла по назначению	Область применения	Требуемые свойства
Ламповые стекла	Колбы и ножки осветительных ламп, различных электровакуумных приборов	Спаиваемость с металлами
Порошковые стекла	Стекланные припои, эмали, прессованные фасонные детали	Низкая температура размягчения
Стекловолокно	Текстильные материалы	Гибкость и эластичность

*Микалекс* – это стекло, наполненное слюдяным порошком. Это дорогостоящий материал. Область применения: держатели мощных ламп, панели воздушных конденсаторов, гребенки катушек индуктивности, платы переключателей.

### Тема 13. Нефтяные электроизоляционные масла

Основную часть нефтяных электроизоляционных масел составляют углеводородные компоненты. Точная химическая формула масел неизвестна.

Нефтяные масла получают путем тщательной очистки остаточных фракций нефти соответствующего уровня вязкости.

**Трансформаторное масло** – наиболее распространенный жидкий диэлектрик, применяющийся в высоковольтном оборудовании. Масло служит в качестве изоляции в силовых трансформаторах, кабелях, высоковольтных выключателях. Кроме того, трансформаторное масло выполняет роль охладителя, отводя тепло от обмоток электрических машин в окружающую среду. В выключателях масло используется в качестве дугогасящего изолятора: выделяющиеся в процессе разрыва электрической дуги газы способствуют охлаждению канала дуги и быстрому ее гашению.

**Конденсаторное масло** используют в качестве диэлектрика в высоковольтных конденсаторах.

Цвет свежего трансформаторного (конденсаторного) масла обычно соломенно-желтый и характеризует глубину очистки масла. Переход к темно-желтому цвету указывает недостаточно полное удаление из масла смолистых соединений. В окисленных маслах, бывших в эксплуатации, потемнение связано с накоплением продуктов окисления: чем их больше, тем темнее масло.

В процессе эксплуатации электрических аппаратов, залитые в них масла претерпевают глубокие изменения, обусловленные *процессами старения*, приводящими к ухудшению химических и электрофизических показателей масел. Основным фактором, влияющим на старение масел, является воздействие кислорода воздуха – сильного окислителя. Процесс окисления ускоряется при увеличении температуры под влиянием электрического поля, света, а также некоторых материалов, являющихся активными катализаторами окисления углеводородов масла. К таким материалам относится медь и ее сплавы.

При возникновении в масле достаточно мощных разрядов происходит разложение углеводородов с образованием горючих газов: водорода, метана и др. На практике по составу газа, выделяющегося из масла в работающем аппарате, можно заблаговременно судить о характере развивающегося повреждения в аппарате. Характеристикой объема выделяющихся газов служит *температура вспышки* масла – температура, при которой газ на поверхности масла вспыхивает при поднесении пламени. В соответствии с ГОСТ, эта температура не должна быть ниже 135 °С.

Изоляционные характеристики масел должны соответствовать *нормам электрической прочности*, приведенным в табл. 4.

Таблица 4

#### Нормы электрической прочности трансформаторных масел

Для аппаратов с рабочим напряжением	Электрическая прочность, кВ/мм
До 15 кВ включительно	20/2,5
От 15 до 35 кВ включительно	25/2,5
От 60 до 220 кВ включительно	35/2,5
От 330 до 500 кВ	45/2,5
750 кВ	55/2,5

Для продления срока службы изоляционных масел используют *герметизацию оборудования* – защиту масла от непосредственного контакта с кислородом воздуха.

Другой метод, позволяющий замедлить накопление продуктов окисления в масле трансформатора, основан на естественной циркуляции масла через *термосифонный фильтр*, заполненный *адсорбентом* – веществом, поглощающим влагу.

Изоляционные свойства масла, бывшего в эксплуатации, могут быть восстановлены в процессе *сушки масла*. При этом масло обрабатывается искусственными цеолитами (молекулярные сита). Для очистки от механических загрязнений, масло фильтруют через пористые перегородки, а также через магнитные фильтры.

#### **Тема 14. Лаки, эмали, компаунды, клеи**

*Лаки* – это растворы пленкообразующих веществ, составляющих лаковую основу. По назначению лаки делятся на пропиточные, покрывные и клеящие.

*Пропиточные лаки* применяются для пропитки изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, в производстве лакотканей. Пропитка обмоток осуществляется с целью их цементации, повышения влагостойкости и нагревостойкости изоляции.

*Покрывные лаки* предназначены для создания защитного электроизоляционного покрытия на пропитанных обмотках, а также для покрытия металлов, различных изоляционных деталей.

*Эмали* – это лаки, пигментированные неорганическими соединениями, то есть имеющие определенный цвет. Пигменты улучшают нагревостойкость и теплопроводность лаковой пленки, повышают ее твердость и атмосферостойкость. Эмали используют, как правило, для поверхностных покрытий.

*Компаунды* – это пропиточные и заливочные составы, не содержащие растворителя. Область их применения в электротехнике велика: для пропитки изоляции обмоток электрических машин, трансформаторов и дросселей, изготовления стеклопластиков и слюдосодержащих материалов, изготовления литой изоляции и литых изделий.

*Синтетические клеи* применяются для крепления различных материалов, где требуется герметичность соединения и стойкость против коррозии. Применение клеев упрощает технологический процесс изготовления деталей, и в ряде случаев является единственным способом крепления. Клеи могут применяться в конструкциях из металлов и неметаллических материалов.

#### **Тема 15. Газообразные диэлектрики**

Основными газообразными диэлектриками, применяющимися в электротехнике, являются: воздух, азот, водород и элегаз (гексафторид серы  $SF_6$ ).

По сравнению с твердыми и жидкими диэлектриками, газы обладают малыми значениями диэлектрической проницаемости и  $\text{tg}\delta$ , высоким удельным сопротивлением и пониженной электрической прочностью.

Свойства газов по отношению к свойствам воздуха (в относительных единицах) приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Свойства газов по отношению к свойствам воздуха**

Характеристика	Воздух	Азот	Водород	Элегаз
Плотность	1	0,97	0,07	5,19
Теплопроводность	1	1,08	6,69	0,7
Удельная теплоемкость	1	1,05	14,4	0,59
Электрическая прочность	1	1	0,6	2,3

*Воздух* используется в качестве естественной изоляции между токоведущими частями электрических машин и линий электропередач. Недостатком воздуха является его окислительная способность из-за наличия кислорода и низкая электрическая прочность в неоднородных полях. Поэтому в герметизированных устройствах воздух используется редко.

*Азот* применяется в качестве изоляции в конденсаторах, высоковольтных кабелях и силовых трансформаторах.

*Водород* имеет пониженную электрическую прочность по сравнению с азотом и применяется в основном для охлаждения электрических машин. Замена воздуха водородом приводит к значительному улучшению охлаждения, так как удельная теплопроводность водорода значительно выше, чем у воздуха. Кроме того, при применении водорода снижаются потери мощности на трение о газ и вентиляцию. Поэтому водородное охлаждение позволяет повысить как мощность, так и КПД электрической машины.

Наибольшее распространение в герметизированных установках получил *элегаз*. Он применяется в газонаполненных кабелях, делителях напряжения, конденсаторах, трансформаторах и высоковольтных выключателях.

Преимуществами кабеля, заполненного элегазом, является малая электрическая емкость, то есть пониженные потери, хорошее охлаждение, сравнительно простая конструкция. Такой кабель представляет собой стальную трубу, заполненную элегазом, в которой при помощи электроизоляционных распорок укреплена проводящая жила.

Заполнение элегазом трансформаторов делает их взрывобезопасными.

Элегаз используется в высоковольтных выключателях – элегазовых выключателях, так как обладает высокими дугогасящими свойствами.

## Тема 16. Проводниковые материалы

В качестве *проводников* электрического тока могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Важнейшими, практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами, являются *металлы и их сплавы*.

К *жидким проводникам* относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Однако для большинства металлов температура плавления высока, и только ртуть, имеющая температуру плавления около минус 39 °С, может быть использована в качестве жидкого металлического проводника при нормальной температуре. Другие металлы являются жидкими проводниками при повышенных температурах.

*Газы и пары*, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Однако, если напряженность поля превзойдет некоторое критическое значение, обеспечивающее начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником с электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема представляет собой особую проводящую среду, носящую название *плазмы*.

Важнейшими для электротехники свойствами проводниковых материалов являются их электро- и теплопроводность, а также способность генерации термоЭДС.

*Электропроводность* характеризует способность вещества проводить электрический ток. Механизм прохождения тока в металлах обусловлен движением свободных электронов под воздействием электрического поля. Поэтому количественная оценка электропроводности описывается дифференциальной формой закона Ома:

$$j = \gamma \cdot E ,$$

где  $j$  – плотность тока;  $\gamma$  – удельная проводимость материала;  $E$  – напряженность электрического поля.

Величина  $\rho$ , обратная удельной проводимости  $\gamma$ , называется удельным сопротивлением, которое для проводника сопротивлением  $R$ , длиной  $L$  и поперечным сечением  $S$  вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}.$$

Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению  $\rho$ .

Также следует отметить, что электропроводность металлов зависит от их температуры (рис. 12). Зависимость удельного сопротивления металла  $\rho$  от температуры  $\theta$  (в диапазоне, до температуры плавления) имеет вид:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)],$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления проводника при температурах  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления проводника, 1/°С.

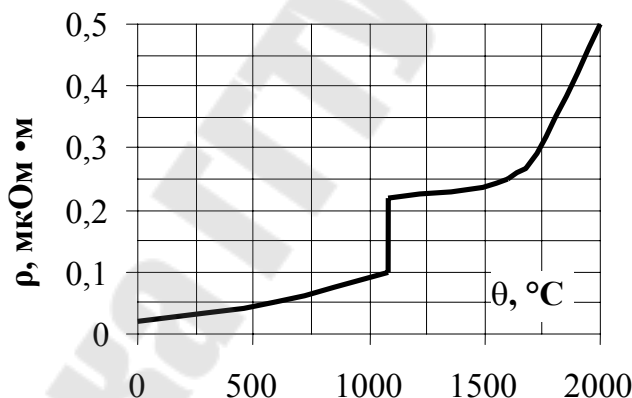


Рис. 12. Зависимость  $\rho = f(\theta)$  для меди

*Теплопроводность* – способность материалов передавать тепло, что количественно описывается законом Фурье:

$$\omega = \chi \cdot \Delta\theta,$$

где  $\omega$  – плотность теплового потока;  $\chi$  – удельная теплопроводность;  $\Delta\theta$  – разность температур на единичном участке длины материала.

За передачу теплоты через металл в основном ответственны те же свободные электроны, которые определяют и электропроводность металлов и число которых в единице объема металла весьма велико.

Поэтому, как правило, коэффициент теплопроводности металлов намного больше, чем диэлектриков. Очевидно, что чем больше удельная электрическая проводимость у металла, тем больше должен быть и его коэффициент теплопроводности. Чистота и характер механической обработки металла могут заметно влиять на его теплопроводность, в особенности при низких температурах.

Если вдоль разомкнутого проводника меняется градиент температуры, то на его концах появляется разность потенциалов – термоЭДС. Это обусловлено тем, что вовлеченные в тепловой поток электроны переносят электрический заряд. ТермоЭДС возникает также и при соприкосновении двух различных металлических проводников. Причина появления этой разности потенциалов заключается в различии значений работы выхода электронов из различных металлов.

Основные электротехнические характеристики свойств некоторых проводников представлены в табл. 6.

Таблица 6

Характеристики свойств проводников при  $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$

Металл	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Удельное сопротивление, мкОм·м	Температурный коэффициент, $10^{-4}\cdot\text{K}^{-1}$	Работа выхода электронов, эВ
Ртуть	10	0,958	9	4,5
Олово	65	0,120	44	4,4
Свинец	35	0,210	37	–
Цинк	111	0,059	–	–
Алюминий	209	0,028	42	4,3
Серебро	415	0,016	40	4,4
Золото	293	0,024	38	4,8
Медь	390	0,017	43	4,3
Никель	95	0,073	65	5,0
Железо	73	0,098	60	4,5
Вольфрам	168	0,055	46	4,5

Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены *металлы высокой проводимости*, имеющие удельное сопротивление  $\rho$  при нормальной температуре не более 0,05 мкОм·м, и *сплавы высокого сопротивления*, имеющие  $\rho$  при нормальной температуре не менее 0,3 мкОм·м. Металлы высокой проводимости используются для

изготовления контактов, проводов и кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов и т. п. Металлы и сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. п. Особый интерес представляют собой обладающие чрезвычайно малым удельным сопротивлением при весьма низких (криогенных) температурах материалы – сверхпроводники и криорпроводники.

К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести медь и алюминий.

Чаще всего *медь* получают путем переработки сульфидных руд. После нескольких плавок руды и обжигов с интенсивным дутьем медь, предназначенная для электротехники, обязательно проходит процесс электролитической очистки. Полученные после электролиза катодные пластины меди переплавляют в болванки массой 80–90 кг, которые прокатывают и протягивают в изделия требующегося поперечного сечения. При холодной протяжке получают твердую медь, которая имеет высокий предел прочности и используется для изготовления контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин. Если же медь подвергать отжигу с последующим охлаждением, то получают мягкую медь, которая пластична и имеет невысокую механическую прочность. Мягкую медь в виде проволоки в основном применяют в качестве токопроводящих жил кабелей и обмоточных проводов, т. е. там, где важна гибкость и пластичность, а не прочность.

В отдельных случаях помимо чистой меди в электротехнике применяются ее сплавы с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием. Такие сплавы, носящие название *бронз*, при правильно подобранном составе имеют значительно более высокие механические свойства, чем чистая медь. Бронзы широко применяют для изготовления токопроводящих пружин и т. п. Кадмиевую бронзу применяют для контактных проводов и коллекторных пластин особо ответственного назначения. Еще большей механической прочностью обладает бериллиевая бронза. Сплав меди с цинком – *латунь* – обладает достаточно высоким относительным удлинением перед разрывом при повышенном по сравнению с чистой медью пределе прочности при растяжении. Поэтому латунь применяют в электротехнике для изготовления всевозможных токопроводящих деталей.

Вторым по значению (после меди) проводниковым материалом является *алюминий*. Алюминий приблизительно в 3,5 раза легче ме-



ди. Алюминий обладает пониженными по сравнению с медью свойствами – как механическими, так и электрическими. При одинаковых сечении и длине электрическое сопротивление алюминиевого провода больше, чем медного в 1,63 раза. Поэтому, если ограничены габариты, то замена меди алюминием затруднена. Прокатка, протяжка и отжиг алюминия аналогичны соответствующим операциям над медью.

*Железо* – наиболее дешевый и доступный металл. Однако его удельное сопротивление в 5 раз выше, чем у меди и алюминия. Сталь, представляющая собой железо с примесью углерода и других элементов, как проводниковый материал используется в виде шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог и пр. Особо прочная стальная проволока применяется для сердечников сталеалюминиевых проводов воздушных линий электропередачи. Так, наиболее популярные провода для воздушных линий – сталеалюминиевые марки АС. Например, АС 95/16 означает, что в поперечном сечении 95 мм<sup>2</sup> алюминия и 16 мм<sup>2</sup> стали.

Важное значение в электротехнике имеет выбор проводников для изготовления электрических контактов. Материалы для контактов должны обладать особыми свойствами. Они должны быть стойкими против коррозии, электрической эрозии и уноса материала, *не свариваться*, иметь высокую износостойкость на истирание, легко обрабатываться, притираться друг к другу, иметь высокую тепло и электропроводность.

Для слаботочных контактов обычно используют благородные или тугоплавкие металлы: серебро, платину, палладий, золото, вольфрам и сплавы на основе этих металлов. Для мощных размыкающих контактов с большими токами дуги (до 100 кА) используют медь-графит контакты. Они хуже свариваются, однако сильно изнашиваются под действием дуги. Псевдосплав с большим количеством графита (более 5 %) используется в качестве щеток в скользящих контактах.

Для изготовления резисторов и электронагревательных приборов используют *сплавы высокого сопротивления*: манганин, константан.

*Манганин* – сплав меди, марганца и никеля, характеризуется низким температурным коэффициентом сопротивления ( $\alpha = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и применяется для изготовления резисторов.

*Константан* – сплав меди с никелем, по свойствам аналогичный манганину, но с более высокой нагревостойкостью. Применяется для изготовления реостатов и электронагревательных элементов. Для изготовления нагревательных элементов используют также сплавы на

основе железа: нихром (железо-никель-хром) и хромаль (железо-хром-алюминий).

Для теории электротехнических проводниковых материалов важное значение имеет явление сверхпроводимости.

*Сверхпроводимость* – явление резкого снижения удельного электрического сопротивления, практически до нуля, при весьма низких температурах. Металлы, обнаруживающие это явление, называют сверхпроводниками (табл. 7).

Таблица 7

#### Критические температуры некоторых сверхпроводников

Металл	Zn	Cd	Al	Ga	In	Ti	Sn	Pb
$T_c, K$	0,88	0,56	1,19	1,09	3,41	1,37	3,72	7,18

Видно, что для металлов критические температуры близки к абсолютному нулю температур. Это область так называемых «гелиевых» температур, сравнимых с точкой кипения гелия (4,2 К).

Для практики представляют интерес *криопроводники* – металлы с очень малым удельным сопротивлением при криогенных температурах (температура кипения жидкого азота порядка 30–70 К). Примером криопроводников является алюминий.

### Тема 17. Полупроводниковые материалы

*К полупроводникам* относится большая группа веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков, и находится в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $10^{10}$  Ом·см.

В энергетике полупроводники напрямую мало используются, но электронные компоненты на основе полупроводников используются достаточно широко. Это любая электроника на станциях, подстанциях, диспетчерских управлениях, службах и т. п., выпрямители, усилители, генераторы, преобразователи. Также из полупроводников на основе карбида кремния изготавливают нелинейные ограничители перенапряжений в линиях электропередачи (ОПН).

Интерес к полупроводникам вызван возможностью управления их свойствами путем добавления небольших количеств других веществ (рис. 13).

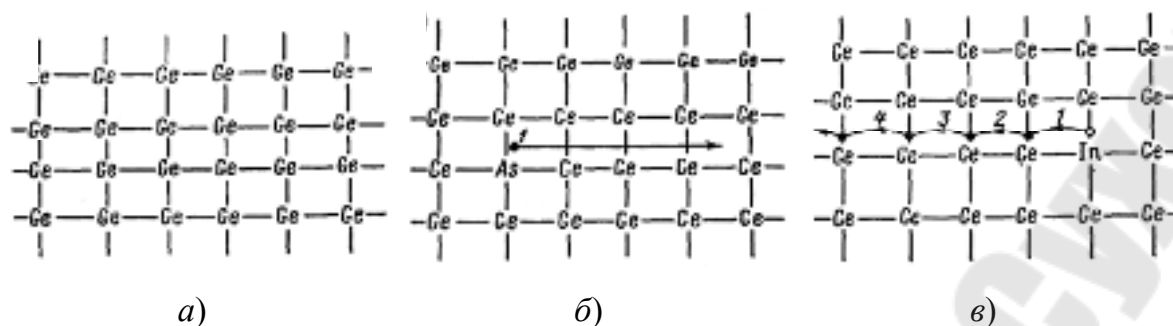


Рис. 13. Кристаллическая решетка германия:  
*a* – без примесей; *б* – с донорной примесью мышьяка;  
*в* – с акцепторной примесью индия (1–4 – номера электронов)

Собственный полупроводник – полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводность (рис. 13, *a*). При добавлении веществ-доноров электронов (например, к германию добавить мышьяк), можно создать полупроводник с электронной проводимостью (рис. 13, *б*). Такой полупроводник называется полупроводником *n*-типа. При добавлении веществ-акцепторов, легко захватывающих электроны (например, к германию добавить индий), создается полупроводник с «дырочной» проводимостью (рис. 13, *в*). Такой полупроводник называется полупроводником *p*-типа. За счет комбинации полупроводников *p*- и *n*-типа созданы различные приборы: диоды, транзисторы, тиристоры, варисторы и др.

Из полупроводниковых материалов в настоящее время наиболее широко используются германий и кремний.

На электропроводность полупроводников существенное влияние оказывают также температура, свет, электрическое поле. При этом в отличие от металлов, удельное сопротивление  $\rho$  полупроводников с ростом температуры снижается (рис. 14).

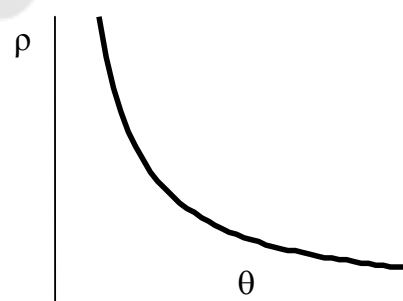


Рис. 14. Зависимость  $\rho = f(\theta)$  для полупроводников

Световая энергия, поглощаемая полупроводником, вызывает появление в нем избыточного количества носителей заряда, и, следовательно, возрастание электропроводности – явление фотопроводимости. Фотопроводимость зависит от интенсивности светового потока и длины световой волны.

Зависимость электропроводности полупроводников  $\gamma$  от напряженности электрического поля  $E$  представлена на рис. 15.

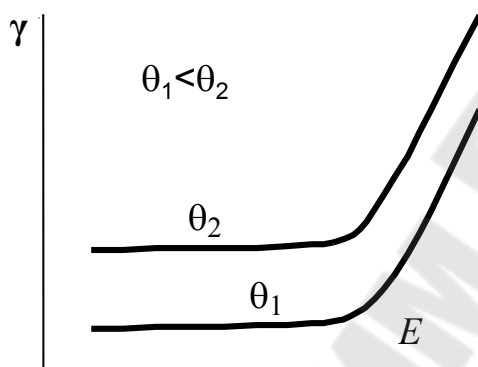


Рис. 15. Зависимость  $\gamma = f(E)$  для полупроводников

При низких значениях напряженности соблюдается закон Ома и удельная проводимость  $\gamma$  не зависит от  $E$ . При более высоких напряженностях наблюдается интенсивный рост удельной проводимости по экспоненциальному закону, приводящий к разрушению структуры полупроводника.

Применение проводников основано на использовании работы  $p$ - $n$  перехода – контакта между двумя полупроводниковыми материалами разного типа проводимости.  $P$ - $n$  переход обладает вентильными свойствами, т. е. проводит электрический ток лишь в одном направлении, что используется при изготовлении диодов, тиристоров и транзисторов.

## Тема 18. Классификация и основные характеристики магнитных материалов

Все вещества в природе являются *магнетиками* в том понимании, что они обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем.

*Магнитными* называют материалы, применяемые в технике с учетом их магнитных свойств. Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств микрочастиц, структуры атомов и молекул.

Магнитные материалы делят на *слабомагнитные* и *сильномагнитные*. К слабомагнитным относят диамагнетики и парамагнетики. К сильномагнитным – ферромагнетики, которые, в свою очередь, могут быть магнитомягкими и магнитотвердыми.

Формально отличие магнитных свойств материалов можно охарактеризовать *относительной магнитной проницаемостью*  $\mu_r$ .

**Диамагнетиками** называют материалы, атомы (ионы) которых не обладают результирующим магнитным моментом. Внешне диамагнетики проявляют себя тем, что *выталкиваются* из магнитного поля. У диамагнетиков  $\mu_r < 1$ . К ним относят цинк, медь, золото, ртуть и другие материалы.

**Парамагнетиками** называют материалы, атомы (ионы) которых обладают результирующим магнитным моментом, не зависящим от внешнего магнитного поля. Внешне парамагнетики проявляют себя тем, что *втягиваются* в неоднородное магнитное поле. У парамагнетиков  $\mu_r \geq 1$ . К ним относят алюминий, платину, никель и другие материалы.

**Ферромагнетиками** называют материалы, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превышать вызвавшее его внешнее магнитное поле. У ферромагнетиков  $\mu_r \gg 1$ .

Любое ферромагнитное тело разбито на *домены* – малые области самопроизвольной (спонтанной) намагниченности. В отсутствие внешнего магнитного поля, направления векторов намагниченности различных доменов не совпадают, и результирующая намагниченность всего тела может быть равна нулю.

Существует три типа процессов намагничивания ферромагнетиков:

1. Процесс *обратимого смещения магнитных доменов* (область 1 на рис. 16). В данном случае происходит смещение границ доменов, ориентированных наиболее близко к направлению внешнего поля. При снятии поля домены смещаются в обратном направлении. Область обратимого смещения доменов расположена на начальном участке кривой намагничивания.

2. Процесс *необратимого смещения магнитных доменов* (область 2 на рис. 16). В данном случае смещение границ между магнитными доменами не снимается при снижении магнитного поля. Исходные положения доменов могут быть достигнуты в процессе *перемагничивания*.

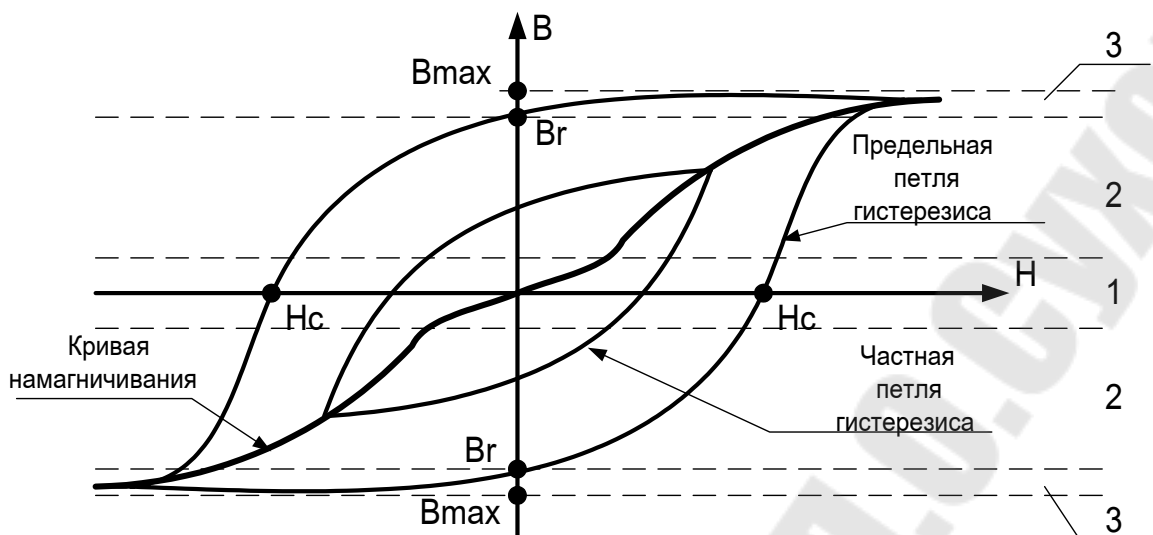


Рис. 16. Процессы намагничивания ферромагнетика

Необратимое смещение границ доменов приводит к *появлению магнитного гистерезиса* – отставанию магнитной индукции  $\vec{B}$  от напряженности поля  $\vec{H}$ .

3. *Процессы вращения доменов* (область 3 на рис. 16). В данном случае завершение процессов смещения границ доменов приводит к *техническому насыщению* материала. В области насыщения все домены поворачиваются по направлению поля. Петля гистерезиса, достигающая области насыщения, называется *предельной*.

Предельная петля гистерезиса имеет следующие характеристики:  $B_{\max}$  – индукция насыщения;  $B_r$  – остаточная индукция;  $H_c$  – задерживающая (коэрцитивная) сила.

Материалы с малыми значениями  $H_c$  (узкой петлей гистерезиса) и большой магнитной проницаемостью называются *магнитомягкими*. Материалы с большими значениями  $H_c$  (широкой петлей гистерезиса) и низкой магнитной проницаемостью называются *магнитотвердыми*.

При перемагничивании ферромагнетика в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые потери энергии, то есть материал нагревается. Эти потери обусловлены потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи. Потери на гистерезис пропорциональны площади петли гистерезиса. Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления ферромагнетика. Чем выше сопротивление – тем меньше потери на вихревые токи.

## Тема 19. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

К магнитомягким материалам относят:

1. Технически чистое железо (электротехническая низкоуглеродистая сталь).
2. Электротехнические кремнистые стали.
3. Железоникелевые и железокобальтовые сплавы.
4. Магнитомягкие ферриты.

Магнитные свойства *низкоуглеродистой стали* (технически чистого железа) зависят от содержания примесей, искажения кристаллической решетки из-за деформации, величины зерна и термической обработки. По причине низкого удельного сопротивления технически чистое железо в электротехнике используется довольно редко, в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока.

*Электротехническая кремнистая сталь* является основным магнитным материалом массового потребления. Это сплав железа с кремнием. Легирование кремнием позволяет уменьшить коэрцитивную силу и увеличить удельное сопротивление, то есть снизить потери на вихревые токи.

Листовая электротехническая сталь, поставляемая в отдельных листах или рулонах, и ленточная сталь, поставляемая только в рулонах, являются полуфабрикатами, предназначенными для изготовления магнитопроводов (сердечников). Магнитопроводы формируют либо из отдельных пластин, получаемых штамповкой или резкой, либо навивкой из лент.

*Железоникелевые сплавы* называют *пермаллоями*. Они обладают большой начальной магнитной проницаемостью в области слабых магнитных полей. Пермаллои применяют для сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей и реле.

*Ферриты* представляют собой магнитную керамику с большим удельным сопротивлением, в  $10^{10}$  раз превышающим сопротивление железа. Ферриты применяют в высокочастотных цепях, так как их магнитная проницаемость практически не снижается с увеличением частоты. Недостатком ферритов является их низкая индукция насыщения и низкая механическая прочность. Поэтому ферриты применяют, как правило, в низковольтной электронике.

К магнитотвердым материалам относят:

1. Литые магнитотвердые материалы на основе сплавов Fe-Ni-Al.

2. Порошковые магнитотвердые материалы, получаемые путем прессования порошков с последующей термообработкой.

3. Магнитотвердые ферриты.

*Магнитотвердые материалы* – это материалы для постоянных магнитов, использующихся в электродвигателях и других электротехнических устройствах, в которых требуется постоянное магнитное поле.



## **ЛИТЕРАТУРА**

### **Основная литература**

1. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, В. В. Тареев. – Ленинград : Энергия, 1985. – 225 с.

### **Дополнительная литература**

2. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – Москва. : Высш. шк., 1986. – 411 с.
3. Преображенский, А. А. Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский. – Москва : Высш. шк., 1983. – 124 с.

### **Научно-методические материалы**

4. Электротехнические материалы: практ. пособие к лаб. работам по одноим. курсу для студентов специальности 42 01 03 / авт.-сост.: М. В. Столбов, Н. В. Токочакова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2004. – 46 с.

## Содержание

Тема 1. Роль электротехнических материалов в энергетике. Классификация электротехнических материалов .....	3
Тема 2. Особенности строения твердых тел. Природа электропроводности твердых тел .....	5
Тема 3. Поляризация диэлектриков и диэлектрическая проницаемость.....	7
Тема 4. Электропроводность диэлектриков .....	10
Тема 5. Диэлектрические потери.....	12
Тема 6. Электрический пробой диэлектриков.....	14
Тема 7. Физико-химические и механические свойства диэлектриков .....	17
Тема 8. Электроизоляционные полимеры .....	19
Тема 9. Волокнистые электроизоляционные материалы .....	20
Тема 10. Пленочные и слюдяные электроизоляционные материалы.....	22
Тема 11. Каучуки и резины .....	23
Тема 12. Электроизоляционные стекла.....	24
Тема 13. Нефтяные электроизоляционные масла .....	25
Тема 14. Лаки, эмали, компаунды, клеи .....	27
Тема 15. Газообразные диэлектрики .....	27
Тема 16. Проводниковые материалы .....	29
Тема 17. Полупроводниковые материалы .....	34
Тема 18. Классификация и основные характеристики магнитных материалов .....	36
Тема 19. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы .....	39
Литература.....	41

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

## **КУРС ЛЕКЦИЙ**

для студентов специальностей  
1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям)  
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»

**Электронный аналог печатного издания**

Авторы-составители: **Зализный** Дмитрий Иванович  
**Колесник** Юрий Николаевич

Редактор *Л. Ф. Теплякова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 26.06.06.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Ризография. Усл. печ. л. 2,44. Уч.-изд. л. 2,65.  
Изд. № 98.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)  
<http://www.gstu.gomel.by>

Издательский центр  
Учреждения образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого».  
ЛИ № 02330/0133207 от 30.04.2004 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Отпечатано на цифровом дуплекаторе  
Учреждения образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого».  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.