

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого»
Кафедра «Электроснабжение»

Г. И. Селиверстов, Д. И. Зализный, Ю. В. Гончаренко

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области энергетики и энергетического
оборудования в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждения высшего образования,
обучающихся по специальности
7-07-0712-01 «Электроэнергетика и электротехника»*

Гомель 2024

УДК 621.315.6(075.8)

ББК 31.23я73

С29

Рецензенты: главный инженер филиала «Гомельские электрические сети» РУП «Гомельэнерго» *В. С. Лавринович*; заведующий отделом технических средств контроля за добычей нефти Белорусского научно-исследовательского и проектного института нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» канд. техн. наук *О. В. Лымарь*

Селиверстов, Г. И.

С29 Электротехнические материалы : учеб.-метод. пособие / Г. И. Селиверстов, Д. И. Зализный, Ю. В. Гончаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – 107 с.

ISBN 978-985-535-540-4.

Изложены основы физики явлений в диэлектрических, полупроводниковых, проводниковых и магнитных материалах. Приведена классификация материалов, описаны их электрические, химико-физические и механические свойства. Рассмотрены способы получения и области применения материалов. Представлены разновидности и характеристики электротехнических материалов, применяющихся в современном электроэнергетическом оборудовании.

Для студентов вузов, обучающихся по электроэнергетическим специальностям, а также для специалистов в области проектирования и эксплуатации энергетического оборудования.

УДК 621.315.6(075.8)

ББК 31.23я73

ISBN 978-985-535-540-4

© Селиверстов Г. И., Зализный Д. И.,
Гончаренко Ю. В., 2024

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2024

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Классификация электротехнических материалов	6
Глава 2. Зонная теория электропроводности твердых материалов	10
Глава 3. Поляризация диэлектриков	14
Глава 4. Электропроводность диэлектриков	21
Глава 5. Диэлектрические потери	27
Глава 6. Электрический пробой диэлектриков	32
6.1. Электрический пробой твердых диэлектриков	32
6.2. Электрический пробой жидких диэлектриков	35
6.3. Электрический пробой газов	36
Глава 7. Физические характеристики диэлектриков	39
7.1. Влажностные характеристики диэлектриков	39
7.2. Тепловые характеристики диэлектриков	40
Глава 8. Твердые полимерные электроизоляционные материалы	44
8.1. Общие сведения о полимерных материалах.....	44
8.2. Материалы на основе полиэтилена	45
8.3. Материалы на основе поливинилхлорида	48
8.4. Материалы на основе полипропилена	51
8.5. Материалы на основе политетрафторэтилена	52
8.6. Электротехнические резины.....	54
Глава 9. Волокнистые электроизоляционные материалы	56
9.1. Древесина и бумага	56
9.2. Текстильные материалы.....	58
9.3. Асбест.....	59
Глава 10. Твердые неорганические диэлектрические материалы	60
10.1. Керамические материалы.....	60
10.2. Неорганические стекла	62
10.3. Слюдяные материалы.....	63
Глава 11. Жидкие диэлектрические материалы	66
11.1. Нефтяные электроизоляционные масла.....	66
11.2. Электроизоляционные лаки и компаунды	69
Глава 12. Газообразные диэлектрики	72
Глава 13. Полупроводниковые материалы	75
Глава 14. Проводниковые материалы	80
14.1. Некоторые физические явления в проводниках	80

14.2. Медь и материалы на ее основе.....	84
14.3. Алюминий и материалы на его основе	87
14.4. Железо и материалы на его основе.....	88
14.5. Вольфрам	91
14.6. Олово и свинец	92
14.7. Графит	92
14.8. Сверхпроводниковые материалы	92
Глава 15. Магнитные материалы.....	95
15.1. Основные магнитные свойства материалов.....	95
15.2. Классификация магнетиков	97
15.3. Физические процессы в ферромагнетиках.....	98
15.4. Магнитомягкие материалы	101
15.5. Магнитотвердые материалы	104
Литература	107

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетика – это отрасль с крайне разнообразной и обширной инфраструктурой, составляющими частями которой являются электростанции, подстанции, линии электропередачи, распределительные устройства. Каждый из этих объектов, в свою очередь, включает множество единиц оборудования как высоковольтного, так и низковольтного. Многие из электроэнергетических устройств имеют очень высокую сложность своей внутренней конструкции: электрогенераторы, силовые трансформаторы, высоковольтные выключатели, устройства релейной защиты и автоматики и т. д.

Очевидно, что характеристики и особенности функционирования любого устройства зависят от видов материалов, входящих в его состав. Свойства материалов определяют как механические, так и электротехнические свойства оборудования. Так, для высоковольтных устройств важнейшими показателями являются электрическая прочность и сопротивление их изоляции. Для линий электропередачи важна высокая электропроводность и механическая прочность проводниковых материалов. Эффективность трансформаторов и электрогенераторов во многом зависит от параметров магнитных материалов, входящих в состав их магнитопроводов.

Помимо электрических и механических свойств надежное функционирование электротехнических материалов в электроустановках определяется тепловыми, влажностными и химическими свойствами этих материалов.

В данном учебно-методическом пособии рассматриваются основные физические явления, возникающие в диэлектриках, проводниках, полупроводниках и магнитных материалах. Значительное внимание уделяется процессам, протекающим в высоковольтных установках. Также в книге представлены разновидности и характеристики электротехнических материалов, применяющиеся в современном электроэнергетическом оборудовании.

Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

По области применения материалы, применяющиеся в электротехнике и электроэнергетике, можно подразделить на конструкционные, электротехнические и конструкционно-электротехнические.

Конструкционные материалы предназначены для удержания требуемой геометрической формы устройства с учетом возможных внешних механических нагрузок.

Электротехнические материалы (ЭТМ) – это разновидность материалов, общим основным свойством которых является их способность взаимодействовать с электромагнитным полем.

Конструкционно-электротехнические материалы совмещают обе функции – удерживать механическую нагрузку и выполнять взаимодействие с электромагнитным полем.

В качестве примера рассмотрим высоковольтную воздушную линию электропередачи на напряжение 330 кВ (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Высоковольтная воздушная линия электропередачи

Опоры этой линии электропередачи (ЛЭП) выполнены из конструкционной стали, основная функция которой – удержание формы и веса конструкции. Однако в верхней части ЛЭП расположен грозо-

защитный трос, имеющий электрический контакт с большинством опор. При разряде молнии в трос возникает электрический ток, протекающий по опоре к элементам ее заземления, находящимся под землей возле ее фундамента. Следовательно, сталь в данном случае служит проводником, то есть ЭТМ, и является конструкционно-электротехническим материалом.

На ЛЭП, показанной на рис. 1.1, закреплены стеклянные подвесные изоляторы, удерживающие на себе вес проводов и изолирующие эти провода от опор. Таким образом, электротехническое стекло в изоляторах также выполняет функции конструкционно-электротехнического материала.

По агрегатному состоянию ЭТМ бывают твердыми, жидкими и газообразными. Твердые ЭТМ, в свою очередь, делятся на кристаллические твердые, полуаморфные и аморфные материалы.

Кристаллические твердые ЭТМ характеризуются высокой степенью упорядоченности входящих в их состав атомов с высокой плотностью. К таким ЭТМ, в первую очередь, относятся металлы. Атомы металла образуют повторяющиеся ячейки, называемые **кристаллической решеткой**. Так, медь, алюминий и железо имеют гранецентрированную кубическую решетку (рис. 1.2).

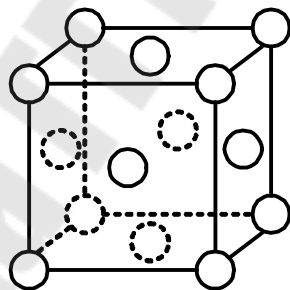


Рис. 1.2. Гранецентрированная кубическая кристаллическая решетка

К кристаллическим твердым ЭТМ относятся многие виды диэлектриков: слюда, песок, цемент, мел и др.

Полуаморфные и аморфные ЭТМ внешне выглядят как твердые материалы, но имеют несимметричное (полуаморфные) или хаотическое (аморфные) расположение атомов и молекул. Плотность этих материалов значительно ниже, чем плотность кристаллических твердых материалов. К полуаморфным материалам относятся неорганическое стекло, твердые пластмассы, материалы на основе целлюлозы. Аморфными являются парафин, воск, стеарин и другие материалы.

Жидкие ЭТМ внешне и под микроскопом выглядят как жидко-

сти. Как правило, это различные виды масел: трансформаторное, кабельное и др.

Газообразные ЭТМ – это воздух, являющийся естественным изолятором воздушных линий электропередачи, и различные газы, входящие в состав электроэнергетического оборудования.

По степени однородности внутренней структуры ЭТМ можно разделить на материалы с однородной структурой, неоднородной структурой, композиционные материалы и наноматериалы.

Если на срезе материала не наблюдается видимых невооруженным глазом неоднородностей, то это **материал с однородной структурой**. Однородными являются металлы, пластмассы, стекла и другие плотные материалы.

Материалы с неоднородной структурой имеют видимые полости, неравномерности. К ним относятся волокнистые материалы.

Композиционными (композитными) называют материалы, состоящие из нескольких плотно прилегающих друг к другу слоев (композитов), между которыми есть видимые границы. Примеры таких материалов: биметалл, миканит (материал на основе слюды), латекс, паронит и др.

В композиционных материалах каждый из композитов вносит какие-либо полезные свойства, формируя таким образом общие свойства материала.

Наноматериалы создаются из специальных нанопорошков, выполняющих функции атомарного конструктора. Для задач электротехники на сегодняшний день применяют углеродные нанотрубки. Перспективным считается материал графен.

По характеру взаимодействия с электрическим полем материалы можно разбить на диэлектрики, полупроводники и проводники.

Диэлектрики – это материалы, основным свойством которых является способность к поляризации и формированию внутреннего электростатического поля при их внесении во внешнее электрическое поле. Полупроводники и проводники таким свойством не обладают.

Диэлектрики можно подразделить на изоляционные материалы, диэлектрики конденсаторов, газы для осветительных ламп.

Изоляционные материалы – это диэлектрики, обладающие низкой электропроводностью, как на постоянном, так и на переменном токе. Основная задача таких материалов – электрическое разделение токоведущих частей электрооборудования между собой и их отделение от окружающей среды.

Любой изоляционный материал является диэлектриком, но не каждый диэлектрик может служить изоляционным материалом.

Диэлектрики конденсаторов предназначены для накопления и хранения внутреннего электростатического поля. На переменном токе такие диэлектрики могут иметь существенную электропроводность.

Полупроводники – это материалы, обладающие двумя типами электропроводности (электронной и дырочной) и имеющие более низкую электропроводность, чем проводники.

Проводники – это материалы, имеющие высокую электропроводность и передающие электрическое поле вдоль своей поверхности.

По характеру взаимодействия с магнитным полем материалы делятся на слабомагнитные и сильномагнитные.

Слабомагнитные материалы очень слабо взаимодействуют с магнитным полем и являются практически прозрачными для него. Почти все материалы в природе являются слабомагнитными.

Сильномагнитные материалы характеризуются интенсивным взаимодействием с магнитным полем и способностью намагничиваться и накапливать внутреннюю энергию магнитного поля. Только три металла обладают такими свойствами при комнатной температуре: железо, никель и хром. Все виды сильномагнитных материалов в той или иной мере содержат эти металлы.

Глава 2. ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Природа электропроводности твердых электротехнических материалов объясняется современной теорией квантовой механики. Рассмотрим базовые определения частиц, которые будут далее встречаться в данном курсе.

Атом – это наименьшая частица вещества, характеризующая его химические свойства (рис. 2.1).

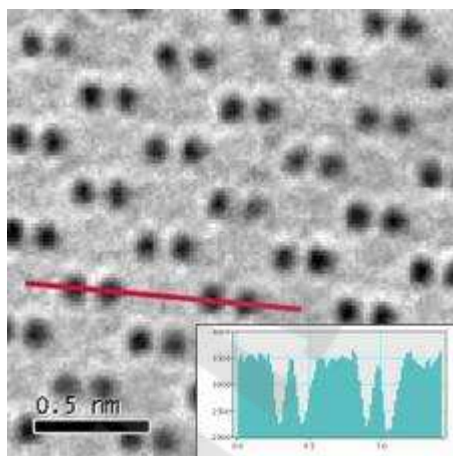


Рис. 2.1. Изображение атомов, полученное с помощью атомно-силового микроскопа

По представлениям современной физики атом состоит из очень малого по размеру положительно заряженного ядра и отрицательно заряженного электронного облака, окружающего ядро и значительно превосходящего его по размеру. Диаметры атомов различны для разных химических элементов и составляют около 0,1 нм. В исходном виде атом электрически нейтрален.

Положительный ион – это атом, утративший один или несколько электронов.

Отрицательный ион – это атом, приобретший один или несколько электронов.

Согласно квантовой механике, все элементарные частицы, образующие атом, одновременно проявляют себя и как часть вещества и как волна. Поэтому нельзя одновременно точно указать, чему равны

координаты X, Y, Z и соответствующие импульсы частиц по этим координатам (принцип неопределенности Гейзенберга). Это можно сделать лишь с некоторой вероятностью, используя математическую статистику.

Движение элементарной частицы условно сопровождается волнами вероятности, которые называются **волнами де Бройля**.

Основным уравнением квантовой механики, описывающим движение и энергию элементарных частиц, является **уравнение Шредингера**, одна из форм записи которого выглядит следующим образом:

$$-\frac{h^2}{8\pi^2m}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}\right) + W_p\psi = W_k\psi, \quad (2.1)$$

где h – постоянная Планка; m – масса частицы; ψ – волновая функция, характеризующая волны де Бройля; x, y, z – координаты пространства; t – время; W_p – потенциальная энергия частицы; W_k – кинетическая энергия частицы.

Уравнение Шредингера – это дифференциальное уравнение в частных производных, не имеющее решения в исходном виде. Решения существуют для ряда частных случаев при упрощениях и допущениях, а также при заданных начальных и граничных условиях. Эти решения составляют класс задач квантовой механики: гармонический осциллятор, потенциальная яма, потенциальный барьер и другие. К таким задачам относят и движение частицы в периодическом поле кристаллической решетки твердого тела.

Частное решение уравнения Шредингера для движения электрона в периодическом поле кристаллической решетки твердого тела дает аналитическую зависимость кинетической энергии электрона от его расстояния до ядра атома. Математическая функция этой зависимости имеет разрывы второго рода (когда производная функции и само значение функции обращаются в бесконечность), показывающие, что энергия электрона при его удалении от ядра атома квантуется, то есть может принимать значения только в некоторых диапазонах, которые называются **зонами разрешенной энергии**. Между этими зонами находятся **зоны запрещенной энергии** (рис. 2.2).

Самая верхняя из зон разрешенной энергии, полностью заполненная электронами, называется **валентной зоной**. В этой зоне энергии электроны связаны в границах атома и не могут образовывать

электрический ток. Если же им придать энергию, достаточную для преодоления самой верхней запрещенной зоны, то они перейдут в **зону проводимости** и станут свободными. Двигаясь по кристаллу под действием внешнего поля, такие электроны формируют электрический ток.

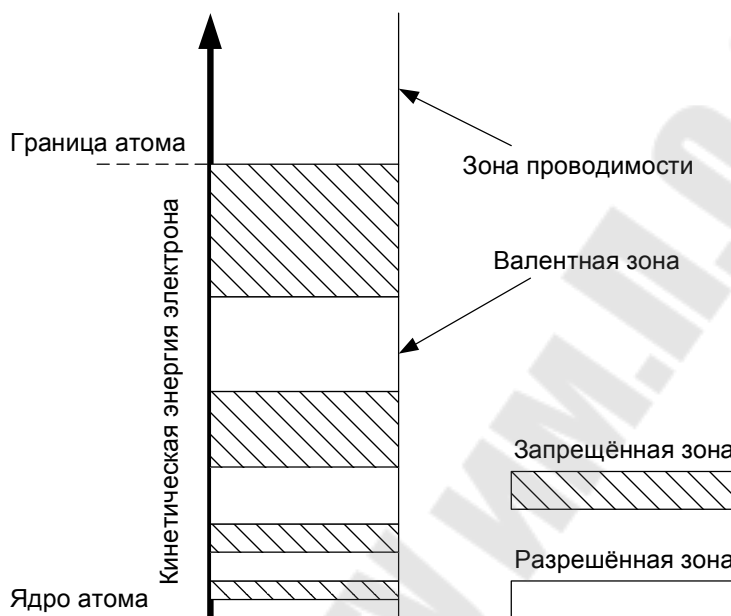


Рис. 2.2. Энергетическая диаграмма для кинетической энергии электрона

Чем шире самая верхняя из запрещенных зон, тем сложнее электронам переходить в зону проводимости, и, соответственно, тем ниже электрический ток и тем выше электрическое сопротивление материала. В зависимости от ширины этой запрещенной зоны материалы условно делят на диэлектрики, полупроводники и проводники (рис. 2.3).

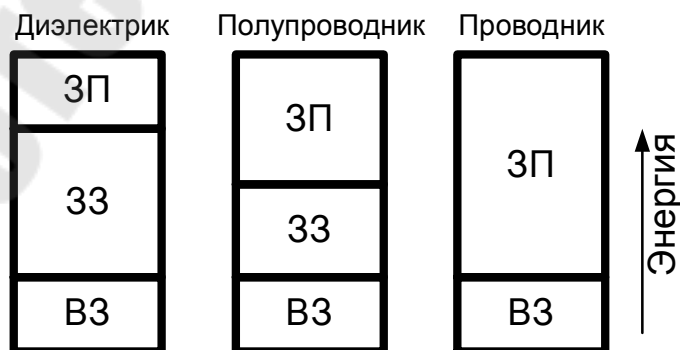


Рис. 2.3. Энергетические диаграммы:
ЗП – зона проводимости; ЗЗ – запрещенная зона; ВЗ – валентная зона

У проводников ширина запрещенной зоны энергии практически равна нулю, поэтому природа их электрического сопротивления не полностью объясняется зонной теорией. В данном случае необходимо учитывать дефекты кристаллических решеток.

Идеальных кристаллических решеток не существует. Все они обладают нарушением периодичности структуры – **дефектами** (рис. 2.4).

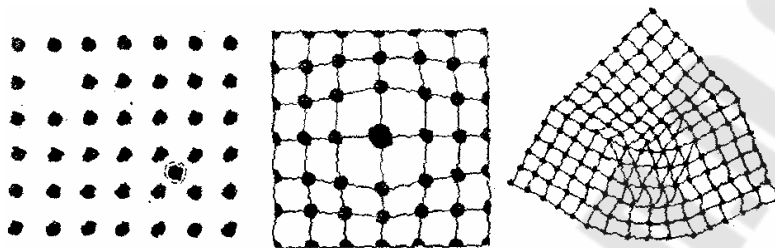


Рис. 2.4. Дефекты кристаллической решетки

Дефекты кристаллической решетки приводят к рассеянию электронных волн де Бройля, в результате чего появляется сопротивление электрическому току. То есть чем сильнее дефекты, тем выше электрическое сопротивление проводника.

Бывают статические и динамические дефекты кристаллических решеток.

Статические дефекты обусловлены наличием примесей в материале, то есть чужеродными атомами, а также механическими деформациями материала.

Практические выводы из этого следующие.

Чем чище металл, чем выше его проводимость. Так наибольшим сопротивлением среди проводников обладают сплавы – смеси различных металлов. Когда отношение металлов в сплаве близко 50 : 50, то электрическое сопротивление такого сплава будет максимально.

При механическом воздействии на металл, например, при ударе по нему, в месте деформации повышается электрическое сопротивление. Такой же эффект наблюдается, если слишком сильно затянуть гайку в болтовом соединении или неаккуратно выполнить сварной шов.

Динамические дефекты возникают из-за теплового колебания частиц и из-за воздействия внешних электромагнитных полей. Это значит, что чем выше температура, тем выше электрическое сопротивление металла. Повышенная радиация, как правило, также будет приводить к возрастанию сопротивления.

Глава 3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

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

Поляризация протекает по принципу: разноименные заряды взаимно притягиваются, а одноименные заряды отталкиваются. Если одну молекулу диэлектрика представить как элементарный диполь с зарядами q , то тогда во внешнем электрическом поле с напряженностью \vec{E} на этот диполь будет действовать пара кулоновских сил \vec{F} , стремящихся развернуть диполь по направлению поля, как показано на рис. 3.1.

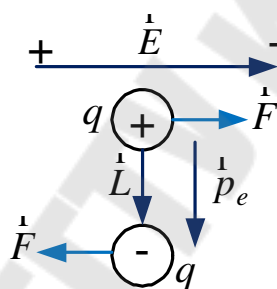


Рис. 3.1. Диполь во внешнем электрическом поле

Силовой характеристикой диполя является дипольный момент \vec{p}_e , определяющийся по формуле

$$\vec{p}_e = q\vec{L}, \quad (3.1)$$

где \vec{L} – вектор расстояния между зарядами.

Степень (уровень) поляризации диэлектрика характеризуется **вектором поляризованности**:

$$\vec{P}_e = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{e,i}, \quad (3.2)$$

где V – объем диэлектрика; n – количество молекул в объеме V .

По характеру зарядов молекул при отсутствии внешнего поля диэлектрики делят на неполярные и полярные.

Неполярные диэлектрики имеют симметричные молекулы, в которых все заряды уравновешены и которые поляризуются только при наличии внешнего поля. Примером такого диэлектрика является полиэтилен (рис. 3.2, а).

Полярные диэлектрики состоят из молекул, поляризованных изначально из-за своей несимметрии. К этому типу относится большинство диэлектриков, но наиболее ярким представителем является вода (рис. 3.2, б).

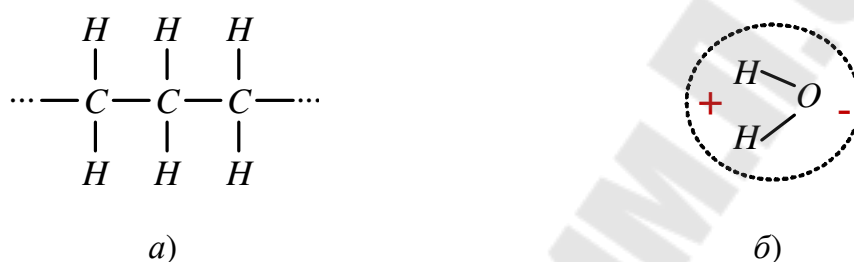


Рис. 3.2. Молекулы диэлектриков:
а – полиэтилен; б – вода

Полярные диэлектрики значительно сильнее поляризуются в электрическом поле, чем неполярные, и это зачастую негативно сказывается на работе электроустановок. Так, молекулы воды, проникая между молекулами диэлектрика (процесс увлажнения), приводят к росту интенсивности процессов поляризации, что, в свою очередь, обуславливает рост токов абсорбции, являющихся частью токов утечки в изоляции.

Рассмотрим подробнее процессы поляризации на примере полярного диэлектрика.

При отсутствии внешнего электрического поля дипольные моменты молекул диэлектрика стремятся ориентироваться таким образом, чтобы модуль вектора поляризованности стремился к нулю (рис. 3.3, а). В этом случае диэлектрик будет деполяризован.

При наличии внешнего поля, то есть при подаче напряжения на электроустановку, начинаются процессы поляризации, и через некоторое время модуль вектора поляризованности стремится к своему максимальному значению (рис. 3.3, б).

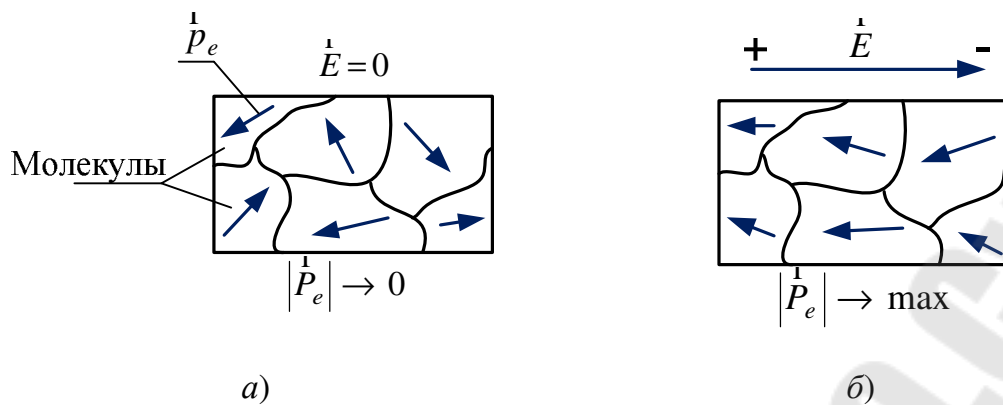


Рис. 3.3. Этапы поляризации диэлектрика:

a – деполаризованный диэлектрик; *б* – поларизованный диэлектрик

Поляризация диэлектрика протекает в течение некоторого времени и зависит как от вида диэлектрика, так и от уровня его увлажненности, а сами процессы поляризации носят преимущественно экспоненциальный характер. Скорость поляризации характеризуется **временем релаксации** в соответствии с выражением:

$$|\dot{P}_e| = P_{e \max} e^{-\frac{t}{\tau_r}}, \quad (3.3)$$

где $P_{e \max}$ – максимальное значение модуля вектора поларизованности; e – экспонента; t – время; τ_r – время релаксации.

Из выражения (3.3) следует, что время релаксации – это время, за которое после отключения внешнего поля диэлектрик деполаризуется в $e = 2,718$ раз. То есть время релаксации является постоянной времени экспоненциальной зависимости.

Если включить на некоторое время напряжение в электроустановке, а затем отключить его, то модуль вектора поларизованности диэлектрика будет изменяться, как показано на рис. 3.4.

Рассмотрим классификацию видов поляризации диэлектриков. Она приведена на рис. 3.5.

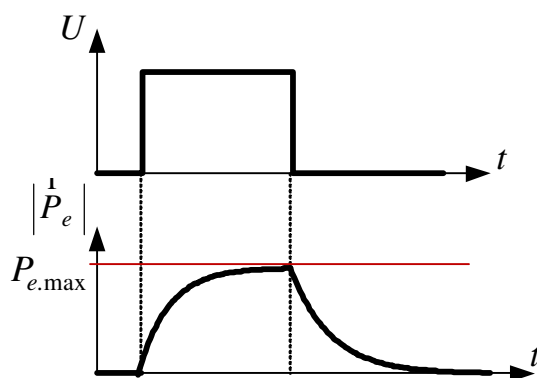


Рис. 3.4. Диаграммы изменения напряжения на диэлектрике и модуля вектора поляризованности

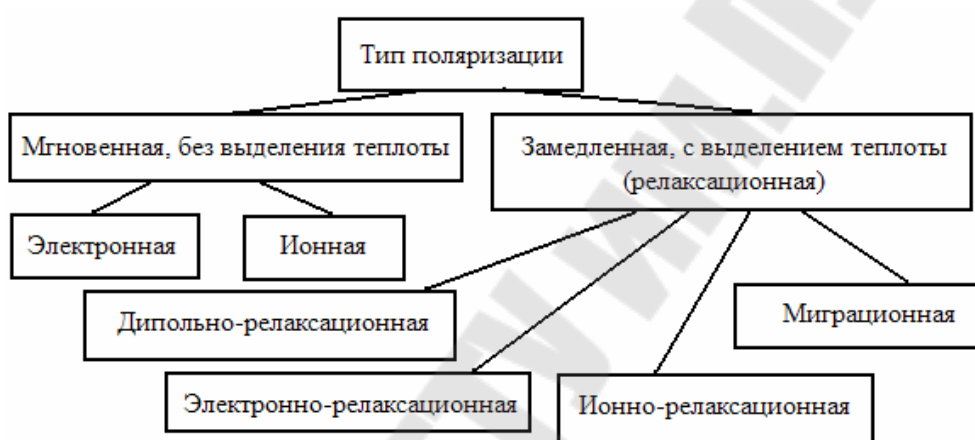


Рис. 3.5. Классификация видов поляризации диэлектриков

Существуют два основных вида поляризации: мгновенная без выделения теплоты со временем релаксации менее 10^{-15} с и замедленная (релаксационная) с выделением теплоты и временем релаксации от единиц до сотен секунд. В первом случае от источника электроэнергии потребляется минимальная энергия, а во втором – повышенная энергия.

Наиболее распространенным видом мгновенной поляризации является **электронная поляризация**, обусловленная деформацией электронных облаков атомов по направлению внешнего электрического поля, как изображено на рис. 3.6. До поляризации атомы нейтральны, а после поляризации на их противоположных сторонах появляются заряды.

Электронная поляризация присутствует практически у всех диэлектриков.



Рис. 3.6. Электронная поляризация:
 а – при отсутствии электрического поля;
 б – при включении электрического поля

Ионная поляризация характерна для диэлектриков с ионной структурой молекул, в которой чередуются положительные и отрицательные ионы (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Ионная поляризация:
 а – при отсутствии электрического поля;
 б – при включении электрического поля

При ионной поляризации ионы кристаллической решетки смещаются по направлению внешнего поля и таким образом происходит разделение зарядов в диэлектрике.

Ионная поляризация характерна для кварца (основной составляющей кварцевого песка) и слюды.

Электронно-релаксационная и **ионно-релаксационная** поляризации протекают в полярных диэлектриках, внутри которых создается вязкая электростатическая среда, препятствующая движению зарядов, то есть замедляющая их движение и требующая повышенного потребления электроэнергии от источника.

Одним из самых медленных видов поляризации является **дипольно-релаксационная поляризация**, характерная для полярных диэлектриков со значительным начальным зарядом молекул, таких,

как вода и многие типы полимерных материалов. Время релаксации для дипольно-релаксационной поляризации может достигать сотен секунд.

Миграционная поляризация проявляется в неоднородных диэлектриках, отдельные слои которых взаимно влияют на электрическое поле друг друга, и, как правило, это влияние приводит к общему замедлению перемещения зарядов и, соответственно, к повышению потребления электроэнергии.

Дополнительное потребление электроэнергии при релаксационных видах поляризации повышает энергию внутренних частиц диэлектрика, то есть обуславливает повышение температуры диэлектрика.

Поляризованный диэлектрик можно представить как конденсатор (рис. 3.8), так как в электроустановках диэлектрики всегда находятся между проводниками либо между проводником, окружающей средой и землей.

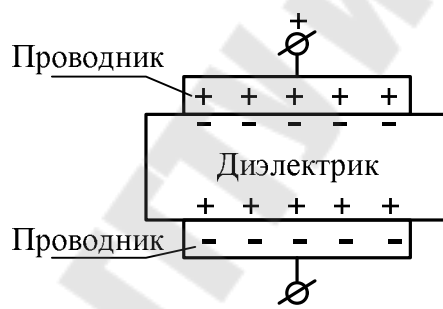


Рис. 3.8. Представление диэлектрика как конденсатора

При подаче напряжения на металлические электроды, прилегающие к диэлектрику, происходит его поляризация, в процессе которой отрицательные заряды его молекул начинают перемещаться по направлению к положительно заряженному электроду (аноду), а положительные заряды – по направлению к отрицательно заряженному электроду (катоду). Таким образом, в диэлектрике возникает внутреннее электрическое поле, противоположное по направлению внешнему полю.

При отключении внешнего напряжения энергия электрического поля хранится в диэлектрике, постепенно уменьшаясь до его деполяризации в соответствии с рис. 3.4. Проводники и полупроводники не способны хранить эту энергию.

Емкость рассматриваемого конденсатора имеет два слагаемых:

$$C = C_0 + C_d, \quad (3.4)$$

где C_0 – емкость, обусловленная мгновенной поляризацией диэлектрика; C_d – емкость, обусловленная замедленной поляризацией диэлектрика.

Емкость C_0 зависит только от формы электродов, подключенных к диэлектрику, а емкость C_d – от свойств материала диэлектрика.

Разделим выражение (3.4) на параметр C_0 . В результате получим:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_0 + C_d}{C_0} = 1 + \frac{C_d}{C_0} = \epsilon. \quad (3.5)$$

Величина ϵ называется **относительной диэлектрической проницаемостью**. Эта величина характеризует способность диэлектрика поляризоваться в электрическом поле.

Для вакуума $C_d = 0$ и, в соответствии с формулой (3.5), $\epsilon = 1$. У газов значение величины ϵ близко к 1. Так, у воздуха $\epsilon \approx 1,006$. Твердые диэлектрики имеют значение относительной диэлектрической проницаемости от 1,5 до 5. Высокие значения величины ϵ характерны для жидких диэлектриков. Например, у воды оно достигает значения 81. Наивысшими значениями относительной диэлектрической проницаемости обладают сегнетоэлектрики, применяющиеся для задач электроники.

Кроме влияния внешнего электрического поля поляризация диэлектрика может появиться при механическом трении и при пьезоэффекте.

В процессе механического трения различных полярных диэлектриков друг о друга заряды, находящиеся на их поверхностях, начинают притягивать противоположные заряды с противоположных поверхностей. В результате поляризуются оба трущихся диэлектрика.

Трение приводит к возникновению электростатических зарядов в электроустановках и является одной из основных причин появления молнии. На основе трения можно получать электроэнергию, что реализуется в электростатических генераторах, таких, как генератор Ван де Граафа.

Пьезоэффект – это явление поляризации диэлектрика при его механической деформации.

На основе пьезоэффекта создают датчики перемещений и небольшие источники электроэнергии.

Глава 4. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Все диэлектрики (даже вакуум) в той или иной мере проводят электрический ток. Этот ток называется **током утечки диэлектрика**.

Ток утечки твердых диэлектриков имеет три слагаемых:

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{Г}} + I_{\text{абс}} + I_{\text{ск}}, \quad (4.1)$$

где $I_{\text{Г}}$ – геометрический ток; $I_{\text{абс}}$ – ток абсорбции; $I_{\text{ск}}$ – сквозной ток.

Рассмотрим природу этих токов.

Геометрический ток $I_{\text{Г}}$ обусловлен электронной поляризацией диэлектрика и составляющей его емкости C_0 в формулах (3.4), (3.5) и зависит только от формы (геометрии) электродов, присоединенных к диэлектрику.

Ток абсорбции $I_{\text{абс}}$, называемый также **током смещения**, вызывается замедленными видами поляризации диэлектрика.

Токи $I_{\text{Г}}$ и $I_{\text{абс}}$ протекают потому, что в процессе поляризации заряды молекул и атомов диэлектрика движутся упорядоченно. По окончании поляризации, то есть когда диэлектрик полностью поляризован, упорядоченное движение зарядов прекращается, и, соответственно, прекращается протекание этих токов. Таким образом, токи $I_{\text{Г}}$ и $I_{\text{абс}}$ являются емкостными токами, и в переменном поле протекают все время, а в постоянном поле – только в моменты включения и отключения поля и пока длится поляризация.

Сквозной ток $I_{\text{ск}}$ обусловлен наличием в диэлектрике небольшого количества свободных электронов и ионов. Эти частицы движутся упорядоченно по направлению поля вне зависимости от формы поля – переменное или постоянное. Следовательно, $I_{\text{ск}}$ – это резистивный ток, протекающий все время, как в переменном, так и в постоянном электрическом поле.

Сопротивление диэлектрика сквозному току называется **сопротивлением изоляции**.

На рис. 4.1 показана схема замещения диэлектрика, в которой присутствуют все слагаемые тока утечки.

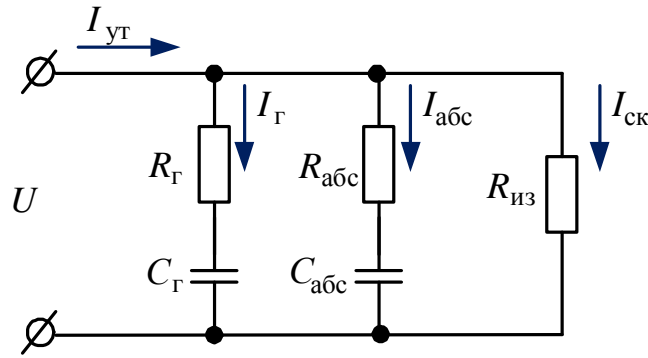


Рис. 4.1. Схема замещения диэлектрика

В схеме на рис. 4.1 обозначено: R_{Γ} и C_{Γ} – эквивалентные сопротивление и емкость в цепи тока I_{Γ} ; $R_{абс}$ и $C_{абс}$ – эквивалентные сопротивление и емкость в цепи тока $I_{абс}$; $R_{из}$ – сопротивление изоляции. При этом характерны следующие соотношения: $C_{\Gamma} \ll C_{абс}$; $R_{\Gamma} \ll R_{абс} \ll R_{из}$.

Рассмотрим переходный процесс (изменение) тока утечки диэлектрика во времени при скачкообразной подаче на него напряжения U . В этом случае емкость C_{Γ} очень быстро зарядится, и геометрический ток I_{Γ} быстро прекратится. Емкость $C_{абс}$ будет заряжаться медленнее, но после ее полной зарядки ток абсорбции $I_{абс}$ также упадет до нуля. В установившемся режиме ток утечки станет равным сквозному току, а сопротивление диэлектрика – равным сопротивлению изоляции.

На рис. 4.2 приведены переходные процессы для тока утечки $I_{ут}$ и сопротивления диэлектрика $|Z|$ при изменении подаваемого напряжения U .

Переходный процесс изменения сопротивления диэлектрика от времени зависит от уровня его увлажненности. Чем больше увлажнен диэлектрик, тем медленнее будет переходный процесс из-за протекания дипольно-релаксационной поляризации. Зависимости для этого случая показаны на рис. 4.3.

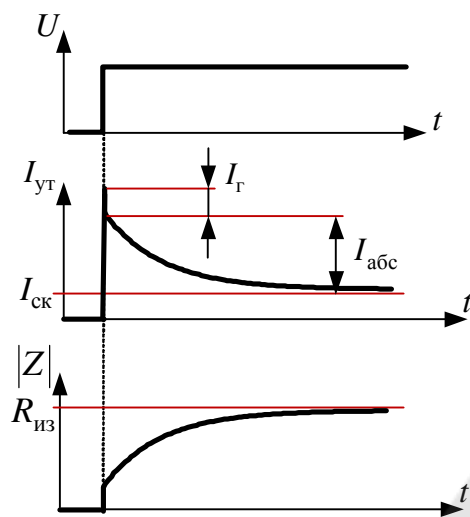


Рис. 4.2. Переходные процессы в диэлектрике

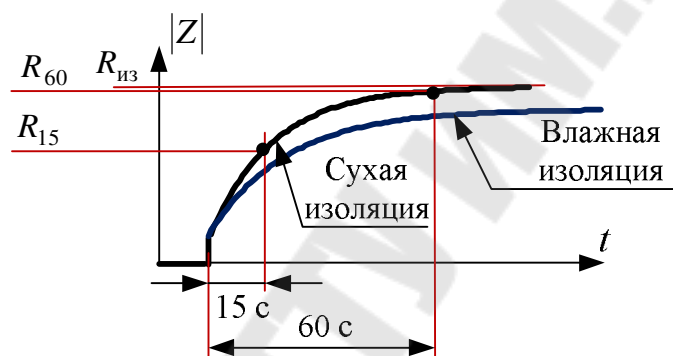


Рис. 4.3. Зависимости сопротивления диэлектрика от времени

Основным параметром, характеризующим уровень увлажненности диэлектрика, является **коэффициент абсорбции**, определяемый по формуле

$$K_{абс} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (4.2)$$

где R_{15} – сопротивление диэлектрика, измеренное через 15 с после начала измерений; R_{60} – сопротивление диэлектрика, измеренное через 60 с после начала измерений.

У влажной изоляции коэффициент абсорбции стремится к единице. Для сухой изоляции он больше 1,3.

Сквозной ток $I_{ск}$, в свою очередь, имеет два слагаемых: поверхностный ток I_s и объемный ток I_v , протекающие, соответственно, в приповерхностной области диэлектрика и через его толщу. Таким об-

разом, сопротивление изоляции диэлектрика $R_{из}$ может быть представлено как параллельное соединение поверхностного R_s и объемного R_v сопротивлений, как показано на рис. 4.4.

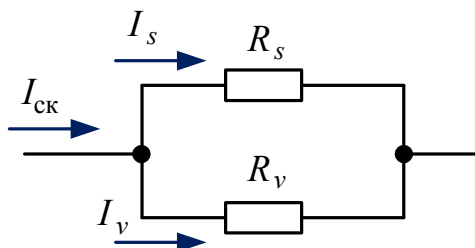


Рис. 4.4. Схема замещения для сопротивления изоляции

Удельное объемное сопротивление диэлектрика определяется по формуле

$$\rho_v = \frac{R_v S}{h}, \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (4.3)$$

где S – площадь сечения электродов, подключенных к диэлектрику; h – толщина диэлектрика.

Значение ρ_v зависит от уровня увлажненности диэлектрика, так как вода снижает значение сопротивления.

Удельное объемное сопротивление имеет следующую зависимость от температуры:

$$\rho_v = \rho_0 e^{-\alpha \theta}, \quad (4.4)$$

где ρ_0 – удельное объемное сопротивление при $\theta = 0$ °С; α – температурный коэффициент сопротивления; θ – температура в °С;

Графически эта зависимость показана на рис. 4.5.

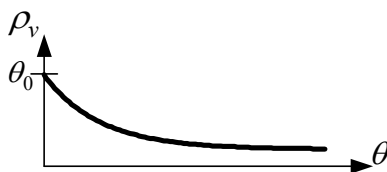


Рис. 4.5. Зависимость удельного объемного сопротивления диэлектрика от температуры

Таким образом, в отличие от проводников, сопротивление диэлектриков уменьшается с ростом температуры.

Удельное поверхностное сопротивление диэлектрика определяется по формуле

$$\rho_s = \frac{R_s d}{l}, \text{ Ом}, \quad (4.5)$$

где d – ширина электродов, размещенных на поверхности диэлектрика; l – расстояние между этими электродами.

Значение ρ_s зависит от **адгезионной способности** диэлектрика, то есть способности его поверхности контактировать с другими материалами. Чем больше загрязнений и влаги на поверхности диэлектрика, тем ниже значение ρ_s .

Электропроводность жидких диэлектриков обусловлена движением их ионов. Различают два типа такой электропроводности: электролиз и электрофорез.

Электролиз – это движение отдельных ионов жидкости под действием электрического поля.

Электрофорез – движение больших групп ионов жидкости.

Жидкости из-за подвижности ионов существенно уступают твердым диэлектрикам по значению удельного объемного сопротивления. Удельное поверхностное сопротивление для них не нормируется, как не нормируется оно и для газов.

Газообразные диэлектрики при низких напряженностях электрического поля обладают очень высокими значениями удельного объемного сопротивления, более 10^{15} Ом·м. Однако при увеличении напряженности поля проводимость газов значительно увеличивается из-за явления ионизации.

Зависимости ρ_v газа от напряжения U и от давления P показаны на рис. 4.6.

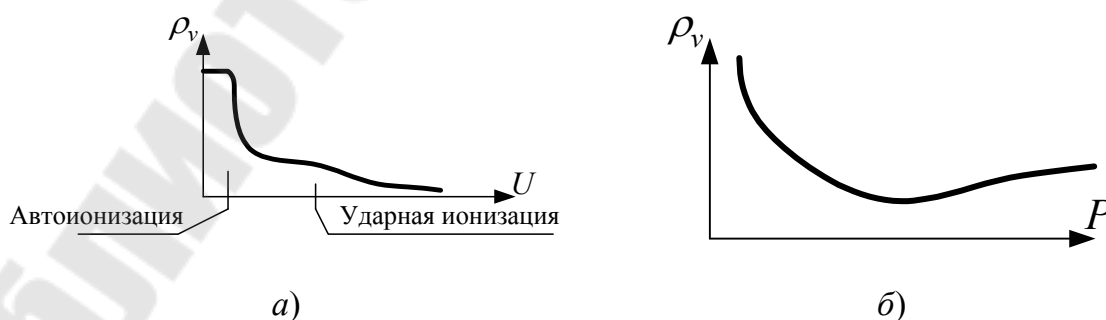


Рис. 4.6. Зависимости удельного объемного сопротивления газа:
а – от напряжения; б – от давления

Возрастание сопротивления газа при низком давлении обусловлено увеличением расстояния между его частицами и ухудшением условий для ударной ионизации. Это свойство используют для создания вакуумных камер гашения электрической дуги в высоковольтных выключателях.

При высоком давлении снижается длина пробега частиц, что также ухудшает условия ионизации и приводит к возрастанию сопротивления газа.

Глава 5. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

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

Диэлектрические потери обусловлены как током абсорбции, так и сквозным током в диэлектрике.

Основной характеристикой диэлектрических потерь является тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ (тангенс дельта). Для анализа этого параметра используют две упрощенные схемы замещения диэлектрика: параллельную и последовательную (рис. 5.1).

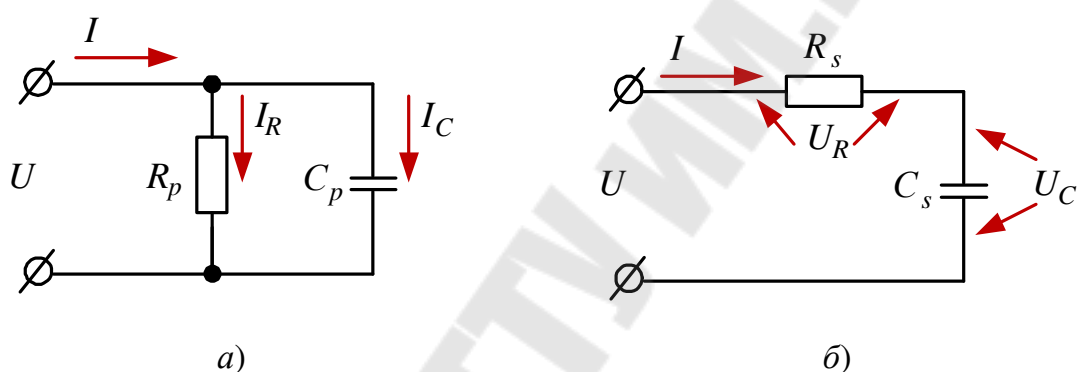


Рис. 5.1. Упрощенные схемы замещения диэлектрика:

a – параллельная; *б* – последовательная:

U – напряжение, подаваемое на диэлектрик; I – эквивалентный ток утечки в диэлектрике; R_p и C_p – эквивалентные сопротивление и емкость в параллельной схеме замещения; I_R – активная составляющая тока I ; I_C – емкостная составляющая тока I ; R_s и C_s – эквивалентные сопротивление и емкость в последовательной схеме замещения; U_R – активная составляющая напряжения U ; U_C – емкостная составляющая напряжения U

Векторные диаграммы для обеих схем замещения показаны на рис. 5.2.

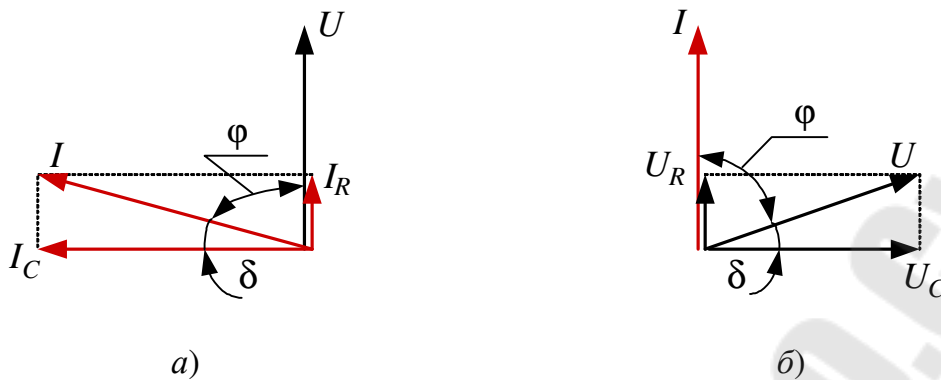


Рис. 5.2. Векторные диаграммы для схем замещения диэлектрика:
a – параллельной; *б* – последовательной

Угол δ на рис. 5.2 называется **углом диэлектрических потерь**. Этот угол дополняет до 90° фазовый сдвиг φ между током и напряжением в цепи диэлектрика.

Для изучения зависимости диэлектрических потерь от $\operatorname{tg}\delta$, рассмотрим параллельную схему замещения (рис. 5.1, *a*).

Запишем выражение для диэлектрических потерь:

$$P_d = UI_R. \quad (5.1)$$

Из векторной диаграммы на рис. 5.2, *a* следует:

$$\delta = \frac{I_R}{I_C}. \quad (5.2)$$

Из теории электротехники известно, что модуль емкостного сопротивления X_C равен:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_p}, \quad (5.3)$$

где f – частота сети; C_p – эквивалентная емкость в параллельной схеме замещения.

Тогда с учетом формулы (5.3) для тока I_C в схеме на рис. 5.1, *a* по закону Ома можно записать:

$$I_C = \frac{U}{X_C} = 2\pi f C_p U. \quad (5.4)$$

Подставив ток I_C из выражения (5.4) в формулу (5.2), а затем ток I_R , выраженный из уравнения (5.2), в формулу (5.1), получим:

$$P_d = U^2 2\pi f C_p \operatorname{tg} \delta. \quad (5.5)$$

Аналогичными действиями можно получить зависимость диэлектрических потерь P_d от тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ и для схемы по рис. 5.1, б. Выражение для диэлектрических потерь в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$P_d = U_R I. \quad (5.6)$$

Из векторной диаграммы на рис. 5.2, б следует:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C}. \quad (5.7)$$

Также из этой векторной диаграммы (см. рис. 5.2, б) получим напряжение U :

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}. \quad (5.8)$$

Аналогично выражению (5.4) можно записать выражение для тока I в рассматриваемой последовательной схеме замещения (см. рис. 5.1, б):

$$I = \frac{U_C}{X_C} = 2\pi f U_C. \quad (5.9)$$

Выразив напряжение U_C из формулы (5.8), подставим его в формулу (5.7). Аналогично, выразив напряжение U_R из формулы (5.8), подставим его в формулу (5.6). С учетом соотношения (5.9), после преобразований выражение (5.6) запишется в виде:

$$P_d = \frac{U^2 2\pi f C_p \operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}. \quad (5.10)$$

При значении $\operatorname{tg} \delta < 0,1$ выражения (5.5) и (5.10) становятся фактически идентичными, и нет разницы, какую из схем замещения (см. рис. 5.1, а и рис. 5.1, б) использовать. Однако на практике для определения мощности диэлектрических потерь, в основном применяют, как наиболее удобную для расчетов, параллельную схему замещения и выражение (5.5).

Из выражений (5.5) и (5.10) следует, что мощность диэлектрических потерь пропорциональна тангенсу угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, поэтому в качестве характеристики диэлектриков принято рассматривать не угол диэлектрических потерь δ , а его тангенс – $\operatorname{tg}\delta$.

Наименьшими значениями $\operatorname{tg}\delta$ обладают газы при низких напряжениях до начала ионизации. Для газов значение $\operatorname{tg}\delta$ составляет около 10^{-8} .

Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ твердых диэлектриков находится в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-5} . У жидких диэлектриков параметр $\operatorname{tg}\delta$ варьируется от 10^{-2} до 10^{-4} .

К значительному росту величины $\operatorname{tg}\delta$ приводит увлажнение диэлектриков. Так, у увлажненной кабельной бумаги $\operatorname{tg}\delta \approx 0,35$.

Возрастание $\operatorname{tg}\delta$ может происходить не только из-за увлажнения, но и из-за химического старения изоляции.

В целом тангенс угла диэлектрических потерь характеризует потери и токи утечки в изоляции на переменном токе, тогда как сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции – на постоянном токе.

Из выражений (5.5) и (5.10) также следует, что диэлектрические потери P_d пропорциональны квадрату напряжения. Это значит, что в высоковольтных установках изоляция нагревается пропорционально квадрату приложенного к ней напряжения.

В качественной изоляции параметр $\operatorname{tg}\delta$ имеет низкое значение, поэтому, несмотря на высокое значение рабочего напряжения, диэлектрические потери в ней будут невелики и ее дополнительный нагрев напряжением будет также незначителен. Однако при росте $\operatorname{tg}\delta$ в процессе эксплуатации возможен существенный рост диэлектрических потерь, что, в свою очередь, может привести к выходу электроустановки из строя.

В соответствии с выражениями (5.5) и (5.10) диэлектрические потери P_d пропорциональны частоте напряжения. То есть в высокочастотных установках происходит существенный нагрев диэлектриков. На основе этого эффекта работает, например, микроволновая печь.

В эксплуатации электрооборудования применяется так называемая высокочастотная сушка обмоток электродвигателей, при которой на обмотки двигателя подается напряжение высокой частоты, они разогреваются и высыхают.

В современной энергетике широко используются преобразователи частоты, работающие на собственных частотах более 100 кГц и приводящие к появлению высокочастотных составляющих напряжения на изоляции силовых кабелей, которые по этой причине могут существенно разогреваться.

На значение параметра $\operatorname{tg} \delta$ также влияет температура диэлектрика. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ от температуры диэлектрика θ и от частоты приложенного напряжения f приведены на рис. 5.3.

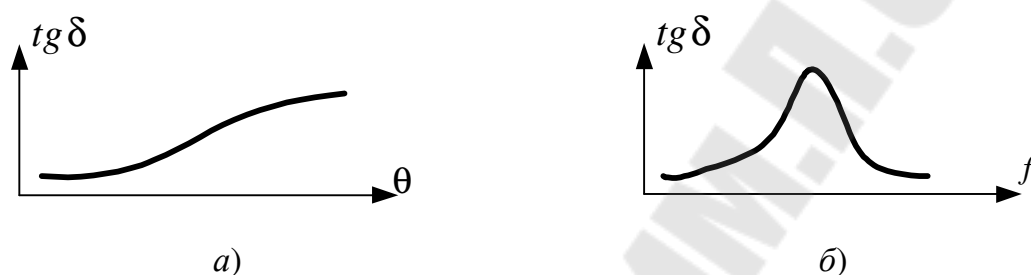


Рис. 5.3. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь: *a* – от температуры диэлектрика; *б* – от частоты напряжения

Зависимость параметра $\operatorname{tg} \delta$ от температуры объясняется тем, что тепловые колебания молекул диэлектрика приводят к появлению в нем дополнительных свободных электронов и ионов и, соответственно, к возрастанию сквозного тока (одной из составляющей тока утечки), приводящего к росту $\operatorname{tg} \delta$.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты обусловлена тем, что на низких частотах диэлектрик успевает полностью поляризоваться до смены знаков напряжения, а на высоких частотах заряды не успевают перемещаться за направлением поля из-за инерции (релаксационной поляризации). В обоих случаях токи абсорбции снижаются и снижается $\operatorname{tg} \delta$. На средних частотах, в том числе и на частоте 50 Гц, значения $\operatorname{tg} \delta$ максимальны для большинства диэлектриков.

Глава 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Электрический пробой – это физическое явление, приводящее к потере диэлектриком своих изоляционных свойств при воздействии на него высокой напряженности электрического поля.

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

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \quad (6.1)$$

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

Электрическую прочность определяют в МВ/м или в кВ/мм.

Вольт-амперная характеристика диэлектрика, на которой показан участок при электрическом пробое, приведена на рис. 6.1.

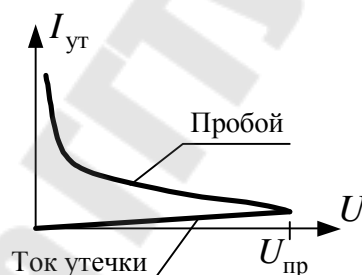


Рис. 6.1. Вольт-амперная характеристика диэлектрика

При пробое сопротивление диэлектрика резко снижается, что приводит к снижению падения напряжения на нем и значительному увеличению тока утечки.

6.1. Электрический пробой твердых диэлектриков

По области протекания различают объемный и поверхностный пробой твердого диэлектрика.

Объемный пробой проходит через толщу диэлектрика и вызывает оплавление, обугливание и разрушение диэлектрика в области протекания тока из-за резкого роста температуры. После пробоя в ди-

электрике остается основной канал и его ответвления, которые называются **триинги** (рис. 6.2, *а*).

Поверхностный пробой возникает в приповерхностной области диэлектрика и приводит к появлению борозд с обугленным материалом по пути протекания тока. При этом также формируется основной канал и его ответвления – **треки** (рис. 6.2, *б*).

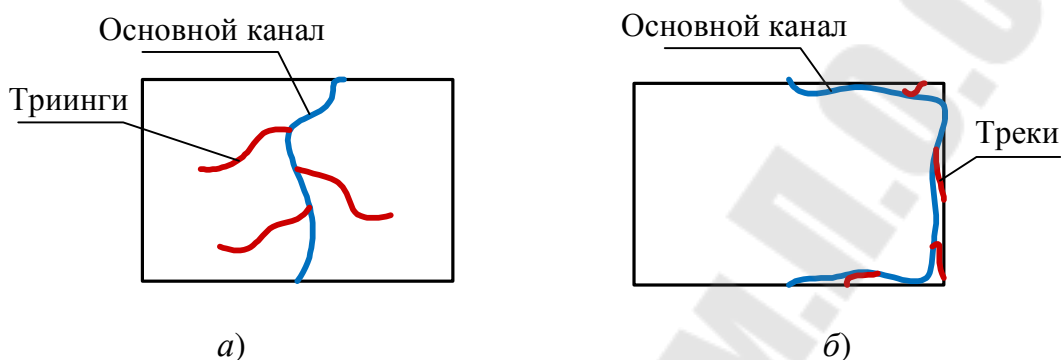


Рис. 6.2. Виды пробоя твердого диэлектрика:
а – объемный пробой; *б* – поверхностный пробой

Даже однократное возникновение объемного пробоя означает выход диэлектрика из строя и необходимость его замены, так как разрушенные области заполняются воздухом или другим газом, имеющим значительно более низкую электрическую прочность, чем твердый диэлектрик. При повторной подаче напряжения на диэлектрик пробой произойдет при низком напряжении по пути первого пробоя.

Длительное горение электрической дуги внутри диэлектрика при доступе кислорода может привести к возгоранию электроустановки.

Поверхностный пробой (или так называемое «перекрытие» изоляции) не всегда требует замены диэлектрика. Иногда поверхность можно очистить и нанести на нее защитное изоляционное покрытие. Однако чаще всего, при обнаружении поверхностного пробоя, например, на изоляторах линии электропередачи, оборудование нужно заменить.

Для снижения вероятности возникновения поверхностного пробоя стремятся увеличить удельное поверхностное сопротивление диэлектрика путем нанесения несмачиваемых покрытий с низкой адгезионной способностью (то есть способностью контактировать с другими материалами). Также стремятся увеличить путь протекания поверхностного тока утечки, придавая поверхности оборудования

специальную форму. Так, изоляторы линий электропередачи и высоковольтных вводов снаружи имеют волнообразную поверхность.

По физике процесса пробой твердых диэлектриков бывает электронным, электротепловым, электромеханическим и электрохимическим.

Электронный пробой обусловлен электронной поляризацией диэлектрика, то есть деформацией электронных облаков атомов по направлению поля (см. рис. 3.6). При некоторой критической напряженности электрического поля энергия электронов становится достаточной для преодоления уровня запрещенной зоны (см. рис. 2.3), и они отрываются, становясь свободными. В результате значение сквозного тока через диэлектрик возрастает и очень быстро (менее 1 мкс) развивается пробой диэлектрика.

Электротепловой пробой вызывается совместным действием высокой напряженности электрического поля и повышенной температуры диэлектрика. Тепловые колебания атомов приводят к дополнительной деформации их электронных облаков и, кроме того, ширина запрещенной зоны энергии уменьшается при росте температуры. Все это повышает вероятность отрыва электронов от атомов и, соответственно, вероятность электрического пробоя диэлектрика.

Основной причиной **электромеханического пробоя** являются механические вибрации в электрооборудовании, обусловленные воздействием электромагнитного поля на обмотки и магнитопроводы (в трансформаторах), вращающимися частями (в электродвигателях) и перемещающимися элементами (в коммутационных аппаратах и реле). В процессе вибраций в изоляции развиваются трещины, в которые проникает воздух или другой газ, понижающий электрическую прочность диэлектрика. В результате через некоторое время (месяцы или годы) может произойти его электрический пробой.

К **электрохимическому пробую** приводит старение изоляции, обусловленное длительным воздействием высокой напряженности электрического поля и проявляющееся в основном появлением **частичных разрядов** – микрозарядов в газовых или жидкостных порах (полостях) диэлектрика. Отдельные частичные разряды не оказывают существенного влияния на электрическую прочность диэлектрика, однако их совместное действие обуславливает появление **дендрита** – древовидного образования с повышенной электропроводностью (рис. 6.3).

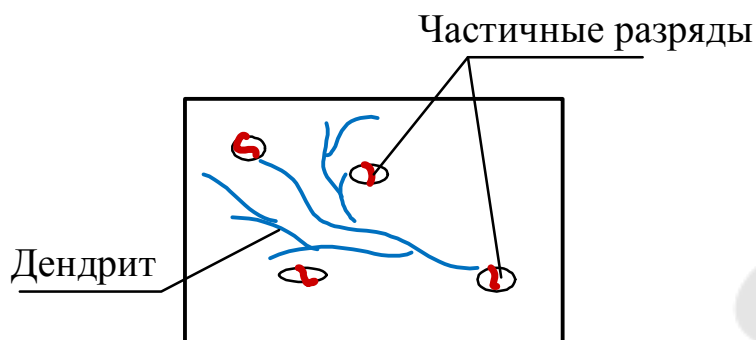


Рис. 6.3. Частичные разряды и дендрит

Процессы химического старения изоляции длятся годами, но в итоге могут привести к ее электрическому пробояю.

6.2. Электрический пробой жидких диэлектриков

Пробой жидких диэлектриков обусловлен имеющимися в них примесями. Самым значительным фактором, снижающим электрическую прочность жидких диэлектриков, является влага. Даже небольшое содержание воды в жидком диэлектрике вызывает заметное снижение электрической прочности.

Вода может содержаться в нефтяных маслах в трех формах: в виде раствора, эмульсии и отстоя на дне сосуда. Причем вода может переходить из одной формы в другую. Снижающим электрическую прочность фактором является вода, содержащаяся в виде **эмульсии** – тонких пленок из молекул воды в толще жидкого диэлектрика. Вдоль этих пленок под действием высокого напряжения формируются электропроводящие цепочки, по которым может произойти электрический пробой.

При возрастании температуры и переходе эмульсии в раствор электрическая прочность нефтяного масла будет возрастать, если под действием высокой напряженности поля не появятся свободные электроны. Тогда, естественно, электрическая прочность масла начнет резко снижаться.

Благодаря подвижности частиц, жидкие диэлектрики после электрического пробоя восстанавливают свою электрическую прочность через некоторое время. Так, электрическая прочность трансформаторного масла через 5–7 минут после пробоя достигает практически первоначального значения. Однако каждый пробой масла сопровождается появлением пузырьков газа и твердых электропрово-

дящих частиц – **шлама**. Для восстановления электрической прочности масла газ должен подняться вверх, а шлам опуститься вниз.

6.3. Электрический пробой газов

Электрическая прочность газообразных диэлектриков существенно зависит от формы (однородное или неоднородное) и характера (постоянное или переменное) электрического поля.

Степень однородности электрического поля определяется формой электродов или металлических частей в электроустановке. Однородное поле возникает между плоскими электродами (рис. 6.4, *а*).

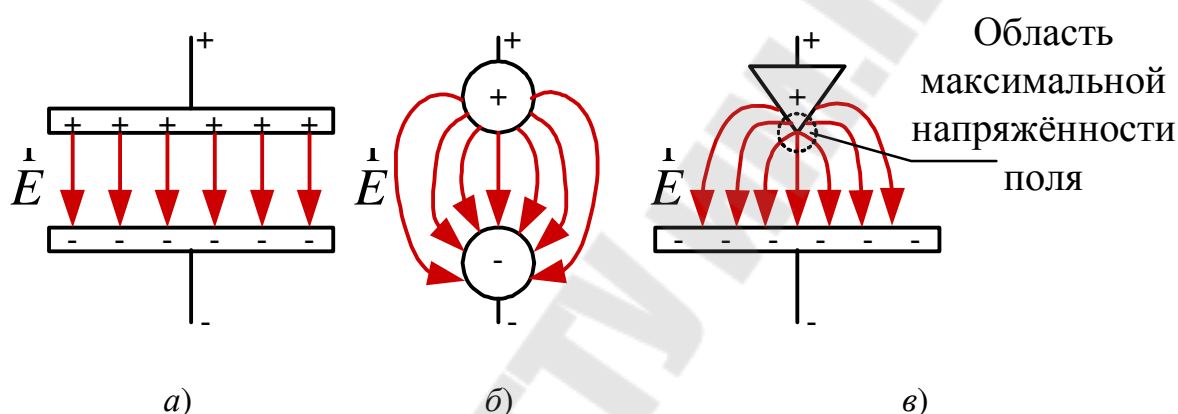


Рис. 6.4. Виды формы электрического поля:
а – однородное; *б* – неоднородное; *в* – резко неоднородное

Поле средней неоднородности появляется вблизи закругленных электродов или проводов (рис. 6.4, *б*). Резко неоднородное поле присутствует вблизи металлического острья (рис. 6.4, *в*).

Чем выше неоднородность электрического поля, тем ниже электрическая прочность газа, так как в области повышенной напряженности поля газ интенсивно ионизируется.

Рассмотрим физику процессов при электрическом пробое газа в постоянном электрическом поле.

Когда напряженность поля между электродами достигает критического значения, начинается **автоионизация** газа – отрыв электронов от его атомов из-за электронной поляризации. Далее оторвавшиеся свободные электроны сталкиваются с нейтральными атомами и выбивают из них вторичные электроны. Этот процесс называется **ударная ионизация**.

При ударной ионизации выделяется также избыток энергии в виде фотонов, которые, распространяясь со скоростью света и сталкиваясь с нейтральными атомами, также выбивают из них электроны. В этом случае происходит **фотоионизация**.

Таким образом, между электродами возникают области с большим количеством свободных электронов, называемые электронными лавинами (рис. 6.5). Эти лавины движутся по направлению к аноду (положительному электроду). Одновременно с этим по направлению к катоду летят более медленные положительные ионы.

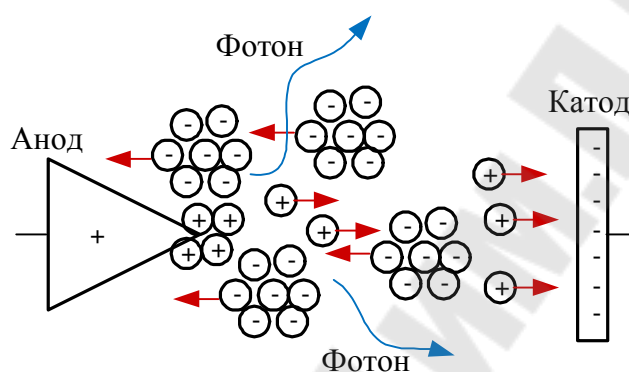


Рис. 6.5. Формирование стримера в процессе пробоя газа

В результате между электродами формируется электропроводящий канал, который называется **стример**, или **лидер**. Наиболее интенсивно эти процессы протекают у металлического острия. Если оно имеет положительный заряд (рис. 6.5), то положительные ионы формируются на конце острия так быстро, что не успевают улететь к катоду. В результате эти ионы накапливаются и служат продолжением острия, эквивалентно уменьшая расстояние между электродами.

Если напряженность поля не достаточно высока для дальнейшего развития процесса пробоя, то на конце острия может формироваться синее или фиолетовое свечение, которое называется **коронный разряд**.

Коронный разряд всегда присутствует вокруг проводов линий электропередачи напряжением 330 кВ и выше и внешне проявляется в виде характерного треска. На коронный разряд расходуется электроэнергия, являющаяся частью потерь электроэнергии в линиях электропередачи.

При достаточно высокой напряженности поля процесс пробоя развивается дальше. Ионы достигают катода и начинают бомбардировать его, выбивая из него множество вторичных электронов и ионов.

В результате между электродами возникает состояние вещества с высокой концентрацией заряженных частиц и высокой температурой, которое называется **плазма**.

Время развития стримера, а затем плазменного канала при небольшом расстоянии между электродами составляет, как правило, менее 1 мкс.

Плазменный канал длительностью менее 1 с (ориентировочно) называется **искровым разрядом**. При длительности более 1 с возникает **дуговой разряд** или **электрическая дуга**.

Появление дугового разряда сопровождается следующими эффектами:

- ярким свечением;
- характерным потрескиванием;
- запахом озона;
- высокой температурой в области разряда;
- электромагнитной волной импульсного характера.

В переменном электрическом поле анод и катод постоянно меняются местами, что приводит, соответственно, к постоянному изменению направления движения заряженных частиц. Это ухудшает условия пробоя, то есть способствует повышению электрической прочности газа. Таким образом, в переменном поле электрическая прочность газа несколько выше, чем в постоянном поле.

Разновидностью искрового разряда является **молния**, возникающая из-за поляризации облака, обусловленной трущимися между собой частицами льда и космической радиацией. Молния образуется либо между облаками, либо между облаком и землей. Разряды молнии в линии электропередачи или другие части электроустановок могут приводить к негативным последствиям.

Дуговой разряд в электроустановках практически всегда является аварийной или ненормальной ситуацией, приводящей к повреждению электрооборудования, за исключением специализированных устройств для гашения электрической дуги.

В промышленности дуговой разряд применяется для электросварки и в плавильных печах.

Характерной особенностью газов является их способность быстро восстанавливать свою электрическую прочность.

Глава 7. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Помимо электрических характеристик на функционирование диэлектриков в электроустановках существенно влияют их влажностные и тепловые характеристики.

7.1. Влажностные характеристики диэлектриков

Молекулы воды имеют очень малые размеры (около 10^{-10} м), поэтому они постоянно проникают между молекулами диэлектрика из окружающей среды, увлажняя его. Это негативно сказывается на работе электроустановок, так как увлажнение снижает электрическую прочность диэлектрика и увеличивает в нем диэлектрические потери, приводящие к его дополнительному нагреву.

Наиболее важными влажностными характеристиками диэлектриков являются гигроскопичность и влагопроницаемость.

Гигроскопичность – это способность диэлектрика накапливать внутри себя влагу. Чем выше гигроскопичность, тем сильнее диэлектрик может увлажниться. Наиболее высокой гигроскопичностью среди изоляционных материалов обладают волокнистые материалы и нефтяные масла. Низкую гигроскопичность имеют диэлектрики с высокой плотностью: неорганические стекла, пластмассы, слюда и др.

Однако существуют материалы – лидеры по гигроскопичности, – предназначенные для высушивания диэлектриков при соприкосновении с ними. Такие материалы называются **сорбентами**. Наиболее распространенным сорбентом, применяющимся в электроэнергетическом оборудовании, является **силикагель**.

Бывает силикагель с синим оттенком. При увлажнении его цвет меняется на розовый, что используется как индикатор увлажненности масла в силовых трансформаторах.

Влагопроницаемость – это способность материала проводить через себя пары воды. Чем выше влагопроницаемость, тем быстрее увлажняется диэлектрик.

Скорость увлажнения диэлектрика также зависит от вида смачиваемости его поверхности: смачиваемая или несмачиваемая.

Угол смачиваемости – это угол между горизонталью и касательной к капле воды в точке ее соприкосновения с горизонтальной поверхностью диэлектрика (рис. 7.1).



Рис. 7.1. Поверхности диэлектрика:
а – несмачиваемая; б – смачиваемая

Если угол смачиваемости $\beta < 90^\circ$, то поверхность несмачиваемая. Если $\beta \geq 90^\circ$ – поверхность смачиваемая.

На смачиваемых поверхностях площадь соприкосновения с водой значительно выше, чем на несмачиваемых поверхностях, поэтому и увлажнение на них протекает более интенсивно.

Несмачиваемые поверхности получают путем нанесения на диэлектрик лаков, эмалей или стеклоэмалей.

7.2. Тепловые характеристики диэлектриков

В процессе нагрева в диэлектрике начинаются структурные изменения, которые имеют серьезный характер, если температура наиболее нагретых участков диэлектрика начинает превышать длительно допустимое значение θ_{\max} .

Нагревостойкость – это способность изоляционного материала работать без ухудшения своих свойств в течение нормативного срока службы при длительно допустимой температуре θ_{\max} . В связи с этим нормируют **классы нагревостойкости** изоляционных материалов (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Классы нагревостойкости изоляции

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

Например, изоляция класса A имеет длительно допустимую температуру 105 °С. Если значение этой температуры превышено, то начинается интенсивный тепловой износ изоляции, приводящий в основном к ухудшению ее механических свойств.

Срок службы изоляции $T_{\text{сл}}$ по критерию ее теплового износа можно рассчитать на основе **закона Аррениуса**:

$$T_{\text{сл}} = Ae^{-B\theta}, \quad (7.1)$$

где A, B – коэффициенты, характеризующие скорость теплового износа изоляции; θ – температура; $e \approx 2,718$ – экспонента.

Зависимость срока службы изоляции $T_{\text{сл}}$ от температуры θ показана на рис. 7.2.

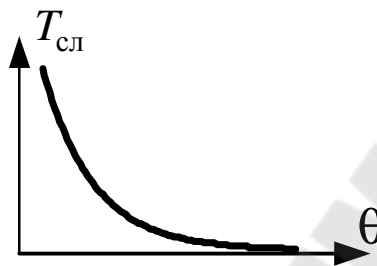


Рис. 7.2. Зависимость срока службы изоляции от температуры

Для практических расчетов более удобной является **формула Монтзингера**, которая следует из более общего закона Аррениуса:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 2^{\frac{\theta(t) - \theta_{\max}}{\Delta\theta}} dt; \\ T_{\text{сл}} = \frac{T_{\text{норм}}}{F}, \end{array} \right. \quad (7.2)$$

где F – относительный износ изоляции; t_1, t_2 – интервал времени, в течение которого работала изоляция; $\theta(t)$ – зависимость рабочей температуры изоляции от времени; θ_{\max} – длительно допустимая температура изоляции по классу нагревостойкости; $\Delta\theta$ – параметр, характеризующий скорость теплового износа изоляции; $T_{\text{норм}}$ – нормативный срок службы изоляции.

Относительный износ изоляции F является безразмерной величиной и характеризует текущую интенсивность износа изоляции. Если $\theta(t) = \theta_{\max}$, то $F = 1$ и $T_{\text{сл}} = T_{\text{норм}}$. То есть при постоянной работе изоляции с температурой θ_{\max} срок ее службы будет равен нормативному сроку $T_{\text{норм}}$.

Для силовых трансформаторов нормативный срок службы изоляции составляет 25 лет, а для силовых кабелей и электродвигателей – 35 лет.

Параметр $\Delta\theta$ равен изменению температуры, при котором скорость износа изоляции изменяется в 2 раза. Так, для силовых трансформаторов в соответствии ГОСТ 14209–95 формулируют **шестиградусное правило** ($\Delta\theta = 6 \text{ }^\circ\text{C}$): при увеличении температуры изоляции трансформатора на каждые $6 \text{ }^\circ\text{C}$ срок ее службы уменьшается в 2 раза.

Аналогично для электродвигателей существует **восьмиградусное правило** ($\Delta\theta = 8 \text{ }^\circ\text{C}$), а для силовых кабелей – **десятиградусное правило** ($\Delta\theta = 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

В качестве примера выполним расчет теплового износа изоляции силового трансформатора при $\theta(t) = \text{const} = \theta$. Тогда первое уравнение системы (7.2) запишется в виде:

$$F = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 2^{\frac{\theta - \theta_{\max}}{\Delta\theta}} dt = \frac{2^{\frac{\theta - \theta_{\max}}{\Delta\theta}} t_2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} dt = 2^{\frac{\theta - \theta_{\max}}{\Delta\theta}}. \quad (7.3)$$

В ГОСТ 14209–95 для силовых трансформаторов принимают $\theta_{\max} = 98 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\Delta\theta = 6 \text{ }^\circ\text{C}$. Тогда в соответствии с выражением (7.3) получим:

$$F = 2^{\frac{\theta - 98}{6}}. \quad (7.4)$$

Из выражения (7.4) следует, что если $\theta = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, то $F = 128$. То есть срок службы изоляции составит:

$$T_{\text{сл}} = \frac{25}{128} = 0,195 \text{ лет.}$$

Это значит, что при $\theta = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ изоляция трансформатора работает весь свой 25-летний ресурс за 71 день.

Кроме нагревостойкости для изоляционных материалов актуальны понятия теплоемкости и теплопроводности.

Теплоемкость – это способность материала накапливать тепло. Данный параметр рассчитывается по формуле

$$C_T = c_{\text{уд}} G, \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{с}}{\text{Вт}}, \quad (7.5)$$

где $c_{уд}$ – удельная теплоемкость материала; G – масса материала.

Чем больше теплоемкость, тем больше тепла может забрать на себя материал. Это актуально для охлаждающих сред, таких как нефтяные масла, воздух и водород. Если у изоляционного материала нет задач выполнения функций охлаждающей среды, то его теплоемкость все равно не должна быть слишком низкой, чтобы замедлить процесс роста температуры в случае быстрого аварийного разогрева прилегающих к этому материалу проводников.

Теплопроводность – это способность материала проводить через себя тепло. Величина, обратная теплопроводности, называется **тепловое сопротивление**.

В общем виде тепловое сопротивление R_T определяется следующим образом:

$$R_T = \rho_T \frac{h}{S}, \frac{Вт}{°C}, \quad (7.6)$$

где ρ_T – удельное тепловое сопротивление материала; h – расстояние, которое проходит тепловой поток в материале; S – площадь поверхности теплоотдачи материала.

Чем меньше тепловое сопротивление, тем быстрее материал остывает, но и быстрее нагревается. В данном случае приоритет отдается остыванию и отводу тепла в окружающую среду.

В общем виде скорость нагрева или охлаждения материала (не только диэлектрика, но и любого материала) определяется **тепловой постоянной времени**, рассчитываемой по формуле

$$\tau_T = R_T C_T. \quad (7.7)$$

Процессы нагрева и охлаждения материалов носят преимущественно экспоненциальный характер с постоянной времени экспоненциальной зависимости τ_T .

Холодостойкость – это способность материала выдерживать длительное воздействие низких температур (ниже -40 °C) без существенного ухудшения своих свойств.

Под воздействием низких температур многие полимерные материалы теряют гибкость и эластичность.

Глава 8. ТВЕРДЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

8.1. Общие сведения о полимерных материалах

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. 8.1), а полиэтилен – 28500.

Органические полимеры бывают двух основных видов: углеродные и кремнийорганические. Подавляющее большинство полимерных материалов, применяющихся в энергетике, являются углеродными.

Углеродные молекулы-полимеры образуются благодаря разрыву двойных химических связей молекул-мономеров (рис. 8.1).



Рис. 8.1. Молекула стирола-мономера (а) и молекула полистирола (б)

Кремнийорганические полимеры (силиконы) формируются за счет силановых связей «кремний – кислород» (рис. 8.2).

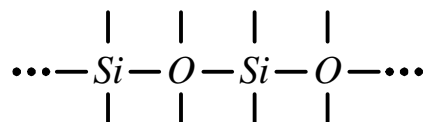


Рис. 8.2. Фрагмент молекулы силикона

По своему строению полимеры могут быть линейными и пространственными.

Линейные полимеры имеют молекулы в виде длинных переплетенных нитей. Они гибки, эластичны и легко растворимы. Линейная структура макромолекул способствует получению полимерных волокон, каучуков, пленок.

Пространственные полимеры состоят из молекул сложной конфигурации, приближающейся преимущественно к шарообразной форме. Они обладают большей жесткостью, чем линейные полимеры и их размягчение происходит при очень высоких температурах. Пространственные полимеры трудно растворимы.

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

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

На основе полимеров получают **пластические массы** (пластмассы). В них полимеры используются в качестве связующих компонентов подобно молекулярному клею.

Помимо исходного полимера пластмассы могут состоять из наполнителей, пластификаторов, стабилизаторов, сшивающих реагентов, красителей и др.

8.2. Материалы на основе полиэтилена

Полиэтилен получают из газа этилена (рис. 8.3).



Рис. 8.3. Молекула этилена (а) и молекула полиэтилена (б)

Полиэтилен является линейным термопластичным неполярным полимером.

В энергетическом оборудовании применяют три вида полиэтилена: высокого давления, низкого давления и сшитый полиэтилен.

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) получают при сжижении этилена под давлением 300 МПа и при температуре 200 °С. Его

также называют полиэтиленом низкой плотности. Международное обозначение ПЭВД: *LDPE – Low Density Polyethylene*.

Полиэтилен высокого давления применяют для изготовления гибких полиэтиленовых пленок, используемых как оберточная вспомогательная изоляция в силовых кабелях и других электроэнергетических устройствах.

Полиэтилен низкого давления (ПЭНД) получают при сжатии этилена под давлением 0,3 МПа и при температуре 80 °С. Его также называют полиэтиленом высокой плотности. Международное обозначение ПЭНД: *HDPE – High Density Polyethylene*.

Основная область применения ПЭНД: кабельная промышленность, где на его основе изготавливают основную изоляцию и защитные оболочки низковольтных проводов и кабелей. Также ПЭНД со специальными добавками, повышающими химическую стойкость, используется в защитных оболочках современных высоковольтных кабелей.

Некоторые добавки снижают горючесть и дымовыделение ПЭНД. Такой ПЭНД называется **самозатухающим**.

Важной особенностью ПЭНД является так называемый «эффект механической памяти». Если трубку из ПЭНД растянуть в ширину, а затем нагреть, то она будет стремиться принять первоначальный диаметр. Это свойство ПЭНД используют при изготовлении термоусаживаемых муфт.

Сшитый полиэтилен (СПЭ) – это полиэтилен с дополнительными химическими связями между молекулами (рис. 8.4). Международное обозначение СПЭ: *XLPE – Cross-Linked Polyethylene*.

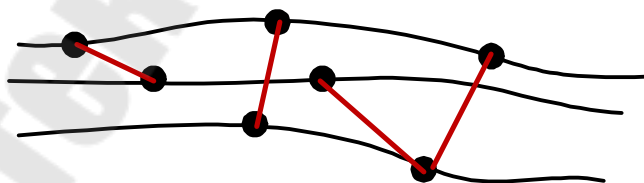


Рис. 8.4. Химическая сшивка молекул полиэтилена

Существует два основных способа сшивки полиэтилена: облучение и добавление сшивающих реагентов.

В первом случае полиэтилен пропускают через ускоритель электронов. Быстрые электроны, сталкиваясь с молекулами полиэтилена, частично разрушают их и способствуют возникновению новых хими-

ческих связей (так называемых химических мостиков). Такой полиэтилен называют **радиационномодифицированным**.

При добавлении специальных реагентов также формируются новые химические связи между линейными молекулами. Если для сшивки добавляются пероксиды, то полиэтилен называют **пероксидносшитым**, если кремнийорганические полимеры, – **силаносшитым**.

Если сшивка происходит при температурах от 90 до 200 °С, то полиэтилен называют **вулканизированным**.

Химическая сшивка превращает линейный полиэтилен в пространственный полимер, что приводит к возрастанию его плотности, механической и электрической прочности. Также возрастают температура его плавления и длительно допустимая рабочая температура. Другие электрические характеристики изменяются несущественно (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Электрические характеристики полиэтилена

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность, МВ/м	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · м	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	Длительно допустимая температура, °С
ПЭВД	2,2–2,3	$(2-3)10^{-4}$	40–50	$10^{14}-10^{15}$	10^{15}	70
ПЭНД	2,3–2,4	$(2-8)10^{-4}$	40–50	$10^{14}-10^{15}$	10^{14}	70
СПЭ	2,4	$(3-5)10^{-4}$	50–90	$10^{14}-10^{15}$	10^{14}	90

Чистый сшитый полиэтилен внешне выглядит как твердый на ощупь слабопластичный материал светло-серого цвета. Область применения сшитого полиэтилена в энергетике – основная изоляция кабелей и проводов. В процессе изготовления кабеля сшитый полиэтилен наносят методом экструзии, то есть наплавления на жилу кабеля.

Рассмотрим кабель марки АПвП (рис. 8.5).

Расшифровка обозначения:

А – алюминиевая жила;

Пв – основная изоляция из вулканизированного сшитого полиэтилена;

П – защитная оболочка из ПЭНД с наполнителями.



Рис. 8.5. Кабель марки АПвП

В кабеле АПвП на алюминиевую жилу вначале наносят слой полупроводящего сшитого полиэтилена с графитовым наполнителем. Этот слой имеет высокую электропроводность. Его задача – выравнивание напряженности электрического поля вокруг жилы, состоящей из сжатых проволок.

Далее идет слой основной изоляции из сшитого полиэтилена. Он имеет светло-серый цвет. На этот слой навиваются слои электромагнитного экрана из электротехнической бумаги, пропитанной графитом, а также слои медных проволок и лент.

Защитная оболочка кабеля выполняется из полиэтилена низкого давления с наполнителями, такими как сажа, придающая черный цвет оболочке и улучшающая ее химическую стойкость.

8.3. Материалы на основе поливинилхлорида

Поливинилхлорид (ПВХ) получают из хлористого винила (рис. 8.6).

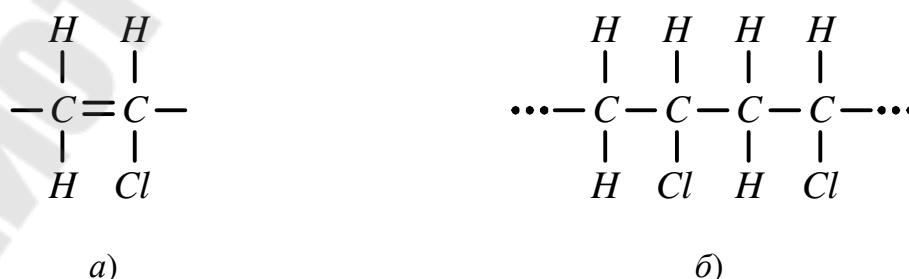


Рис. 8.6. Молекула хлористого винила (а) и молекула поливинилхлорида (б)

Международное обозначение ПВХ: *PVC – Polyvinyl Chloride*.

ПВХ является пространственным термореактивным полярным полимером.

В энергетическом оборудовании применяют два вида ПВХ: винипласт и ПВХ-пластикат.

Винипласт – это ПВХ без добавления пластификаторов.

Винипласт представляет собой твердый на ощупь непластичный материал обычно бежевого или коричневого оттенка. Из этого материала изготавливают пластины толщиной несколько миллиметров, использующиеся в качестве прокладок, подложек, перегородок в различных электротехнических устройствах.

Важным свойством винипласта является его способность интенсивно выделять газ в непосредственной близости от электрической дуги. Этот газ повышает давление в канале дуги и способствует ее гашению. Поэтому на основе винипласта выполняют простейшие камеры для гашения дуги, например, в таких аппаратах, как высоковольтные выключатели нагрузки (рис. 8.7).



Рис. 8.7. Выключатель нагрузки

ПВХ-пластикат – это ПВХ с добавлением пластификаторов.

ПВХ-пластикат может иметь различные цвета в зависимости от добавляемых в него красителей. На ощупь это гладкий пластичный материал.

Применяется ПВХ-пластикат для основной изоляции низковольтных проводов и кабелей, а также для защитных оболочек высоковольтных кабелей. Основное преимущество этого материала – повышенная химическая стойкость и холодостойкость. Главный недостаток ПВХ-

пластиката заключается в ухудшении электрических свойств ПВХ после добавления в него пластификаторов (табл. 8.2).

Таблица 8.2

Электрические характеристики поливинилхлорида

Ма-те-риал	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность, МВ/м	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · м	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	Длительно допустимая температура, °С
Вини-пласт	3,2–3,6	$(15–25)10^{-3}$	20–30	$10^{14}–10^{15}$	10^{14}	70
ПВХ-пластикат	5–6	$(30–80)10^{-3}$	15–20	$10^{13}–10^{14}$	10^{14}	90

Из табл. 8.2 видно, что материалы на основе ПВХ значительно уступают по электрическим свойствам материалам из полиэтилена. При этом ПВХ-пластикат имеет повышенную нагревостойкость – до 90 °С.

В качестве примера рассмотрим кабель марки АВВГ (рис. 8.8).

Расшифровка обозначения:

А – алюминиевая жила;

В – основная изоляция из ПВХ-пластиката;

В – защитная оболочка из ПВХ-пластиката с химостойкими добавками (сажа и другие);

Г – не имеющий металлической брони (экрана).

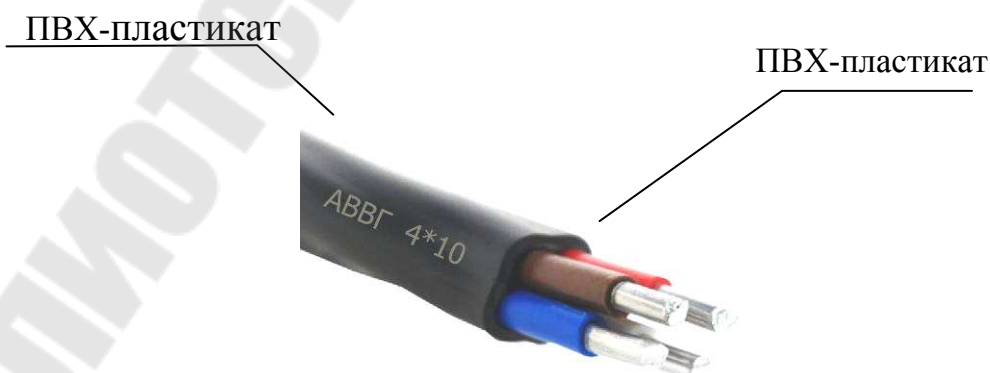


Рис. 8.8. Кабель марки АВВГ

Помимо кабельной промышленности ПВХ-пластикат применяется для изготовления изоляционных лент (изолент).

8.4. Материалы на основе полипропилена

Полипропилен получают из пропилена (рис. 8.9).



Рис. 8.9. Молекула пропилена (а) и молекула полипропилена (б)

Международное обозначение полипропилена: *PP – Polypropylene*.

По электрическим свойствам полипропилен близок к полиэтилену, но несколько уступает ему по электрической прочности (табл. 8.3). При этом класс нагревостойкости полипропилена значительно выше и достигает 130 °С.

Таблица 8.3

Электрические характеристики полипропилена

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность, МВ/м	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · м	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	Длительно допустимая температура, °С
ПП	2,2–2,4	$(2–5)10^{-4}$	25–40	$10^{14}–10^{15}$	10^{14}	130

Полипропилен имеет повышенную химическую стойкость и применяется в качестве изоляции проводов и кабелей, эксплуатирующихся в сложных условиях окружающей среды.

В качестве примера рассмотрим кабель марки КПвПпБП-130 (рис. 8.10).

Расшифровка обозначения:

К – кабель для питания погружных электродвигателей в нефтедобывающих скважинах;

Пв – первый слой изоляции на жиле из радиационно-модифицированного (сшитого) полиэтилена;

Пп – второй слой изоляции на жиле из композиций блоксополимера пропилена с этиленом;

Б – наружная оболочка (броня) из стальной оцинкованной ленты;

П – плоский;

130 – максимальная рабочая температура изоляции жилы.

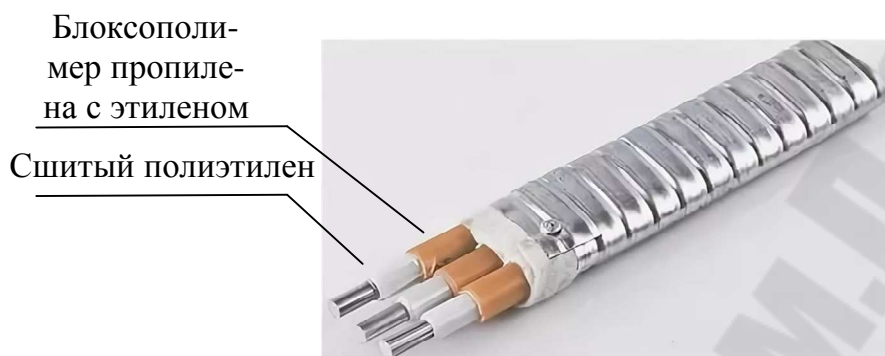


Рис. 8.10. Кабель марки КПвПпБП-130

8.5. Материалы на основе политетрафторэтилена

Политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон) получают путем полимеризации тетрафторэтилена (рис. 8.11).



Рис. 8.11. Молекула тетрафторэтилена (а) и молекула политетрафторэтилена (б)

Международное обозначение политетрафторэтилена: *PTFE* – *Polytetrafluorethylene*. Далее будем называть его фторопласт-4.

Фторопласт-4 – это гладкий на ощупь материал белого или серого цвета. Он обладает очень хорошими электрическими свойствами (табл. 8.4), но главные его преимущества – это исключительно высокая химическая стойкость и крайне высокая нагревостойкость (до 250 °С).

Электрические характеристики полипропилена

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность, МВ/м	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · м	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	Длительно допустимая температура, °С
ПТФЭ	1,9–2,2	$(1-3)10^{-4}$	20–30	$10^{15}-10^{16}$	10^{15}	250

Фторопласт-4 негорюч, абсолютно негигроскопичен и имеет несмачиваемую поверхность. К его недостаткам относятся высокая стоимость, плохая устойчивость к воздействию радиации и электрической дуги.

Из фторопласта-4 изготавливают изоляцию проводов, предназначенных для работы при одновременном воздействии высоких температур и химически агрессивных сред.

В качестве примера рассмотрим провод марки МГТФ (рис. 8.12).



Рис. 8.12. Провод марки МГТФ

Расшифровка обозначения:

М – монтажный;

Г – гибкий;

Т – термостойкий;

Ф – с фторопластовой изоляцией.

Также из фторопласта-4 изготавливают тонкие листы и гибкие пленки, используемые в качестве вспомогательной изоляции, например, в электродвигателях.

8.6. Электротехнические резины

Резина – это разновидность пластической массы, в которой в качестве связующего полимера используется каучук.

Каучук представляет собой полимерный материал, молекулы которого имеют зигзагообразную форму (рис. 8.13), придающую каучуку свойство иметь значительное удлинение при растяжении.

Бывает натуральный и синтетический каучук. Натуральный получают из сока дерева гевея, произрастающего в экваториальных областях. Синтетические каучуки бывают бутадиеновыми, хлоропреновыми и кремнийорганическими.

Резину получают при вулканизации каучука серой.

Вулканизация – это процесс нагрева каучука после введения в него серы.

Сера выполняет функцию сшивающего реагента для каучука, связывая между собой его линейные молекулы (рис. 8.13).

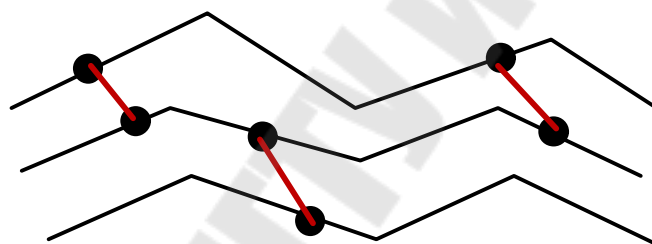


Рис. 8.13. Сшивка молекул каучука серой

В состав резин для удешевления и придания требуемых свойств также вводят наполнители: мел, тальк, сажу.

Существует два основных вида резины: твердая (эбонит) и мягкая. Твердую резину получают при добавлении 30–35 % серы, а мягкую – при добавлении 1–3 % серы.

Эбонит применяют для изготовления упругих подкладок, шайб и перегородок в электрооборудовании.

Мягкую резину используют значительно шире. Из нее получают изоляцию гибких кабелей, таких как кабель марки КГ (рис. 8.14).

Для основной изоляции жил кабеля применяют резину типа РТИ-1 – тиурамовую резину на основе натурального и бутадиенового каучуков с меловым наполнителем.

Тиурам – сернистое соединение, не содержащее свободной серы, которая разрушает медь.

Для наружной оболочки используют резину типа РШТ-2 – шланговую резину с сажевым наполнителем, улучшающим механические свойства и повышающим химическую стойкость резины.

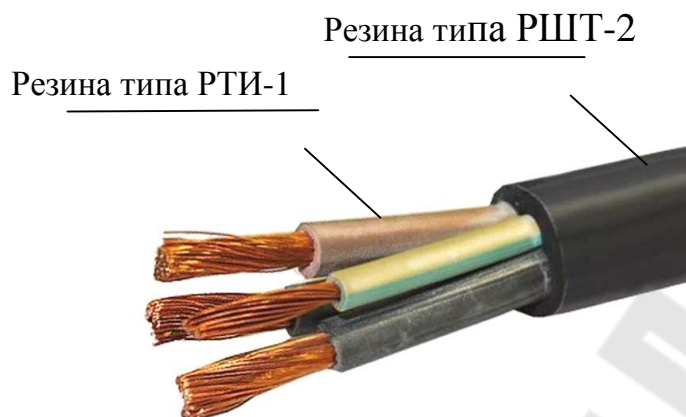


Рис. 8.14. Кабель марки КГ

На основе мягкой резины изготавливают электротехнические средства: диэлектрические перчатки, коврики, боты.

Также мягкая резина является основой для композиционного материала, называемого **паронит**, в который добавляют еще кусочки асбеста или слюды. Паронит применяется в гибких упругих электроизоляционных прокладках, работающих под воздействием газовых сред с повышенным давлением.

В последние десятилетия в энергетике все большее применение находит кремнийорганическая резина на основе кремнийорганического каучука. Эта резина имеет высокие механические показатели и термостойкость до 250 °С.

Из кремнийорганической резины изготавливают высоковольтные изоляторы (так называемые полимерные изоляторы), опоры линий электропередачи, изоляцию проводов.

Глава 9. ВОЛОКНИСТЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Волокнистыми называют материалы, состоящие из частиц удлиненной формы – волокон.

Основные преимущества волокнистых материалов: низкая стоимость, высокая механическая прочность, гибкость. Недостатки: значительная гигроскопичность и низкая электрическая прочность в непропитанном состоянии.

Для задач энергетики используют волокнистые материалы растительного, животного, минерального и синтетического происхождения.

Материалы растительного происхождения – это материалы на основе белка целлюлозы: древесина, бумага, хлопчатобумажная пряжа и другие. Из материалов животного происхождения применяется натуральный шелк. К волокнистым материалам минерального происхождения относятся асбест и стекловолокно. Материалы синтетического происхождения – это шелк, лавсан, капрон и др.

Большинство волокнистых материалов применяют в пропитанном состоянии. Пропитывающие составы (масла либо лаки) заполняют поры между волокнами, существенно повышая электрическую прочность исходного материала.

9.1. Древесина и бумага

Древесина является исторически первым диэлектриком, применяющимся в электротехнике. Главные ее недостатки – высокая гигроскопичность и невысокая механическая прочность.

На сегодняшний день древесина применяется в пропитанном состоянии для изготовления вспомогательных крепежных элементов в крупных силовых трансформаторах и электродвигателях. Также еще находятся в эксплуатации деревянные опоры для линий электропередачи. В электротехнике используют твердые породы дерева, такие как бук, ольха, береза.

Бумага – это листовой материал, получаемый из измельченной древесины, которую варят в воде с добавлением сшивающих реагентов. Таким образом, бумагу можно рассматривать как сшитую целлюлозу.

Бывает сульфитная и сульфатная бумага.

Сульфитная бумага получается при добавлении сернистой кислоты H_2SO_3 . Эта бумага характеризуется невысокой механической прочностью, поэтому используется в качестве писчей.

Сульфатная бумага содержит едкий натрий $NaOH$, имеет высокую механическую прочность и применяется как электротехническая и упаковочная. Главное ее преимущество – низкая стоимость. Внешне сульфатная бумага темнее, толще и шершавее сульфитной.

Сульфатная бумага на сегодняшний день – один из самых распространенных изоляционных материалов в энергетике, так как в пропитанном состоянии является основной изоляцией силовых трансформаторов, высоковольтных кабелей, силовых конденсаторов, высоковольтных вводов и высоковольтных электродвигателей.

Промышленностью выпускается электротехническая бумага общего назначения, кабельная бумага, конденсаторная бумага. Наилучшие характеристики имеет конденсаторная бумага.

В качестве примера рассмотрим кабель ААШв-10 (рис. 9.1).



Рис. 9.1. Кабель марки ААШв-10

Расшифровка обозначения:

А – алюминиевая жила;

отсутствие буквы, обозначающей изоляцию – бумажная изоляция;

А – алюминиевая броня;

Шв – наружная оболочка (шланг) из ПВХ-пластиката;

10 – номинальное напряжение 10 кВ.

В силовых кабелях бумагу пропитывают кабельным маслом, в силовых трансформаторах – трансформаторным маслом, в силовых конденсаторах – конденсаторным маслом. Пропитка резко снижает гигроскопичность бумаги.

9.2. Текстильные материалы

Текстильными (тканями) называют материалы, волокна которых упорядочены в виде решетки.

К электротехническим относят хлопчатобумажные, шелковые, лавсановые, капроновые и стекловолоконные ткани. Их главные преимущества: высокая механическая прочность, гибкость, стойкость к истиранию.

Ткани применяются в электротехнических устройствах в пропитанном и непропитанном состоянии в качестве оберточной изоляции, повышающей надежность и долговечность работы оборудования.

Некоторые марки проводов и кабелей имеют наружные защитные покровы из тканей.

Лакоткань – это композиционный материал, состоящий из тканевой основы и пропитывающего лака. Различают лакоткани, пропитанные масляными лаками, и масляно-битумными лаками. Первые имеют желтые оттенки, а вторые – черные. В качестве тканевой основы используют хлопчатобумажную пряжу или шелк.

Черные лакоткани обладают более высокими электрическими и механическими показателями, однако их стойкость к органическим растворителям понижена.

Лакоткани используют как оберточную изоляцию в силовых кабелях и электродвигателях.

Стеклоткань – это ткань на основе стекловолокна, получаемого из неорганического стекла. Основное преимущество такой ткани – негорючесть. При пропитке специальными лаками она обладает низкой гигроскопичностью и высокой электрической прочностью.

На основе прессования волокнистых материалов смолами получают **слоистые пластики**. К ним относят гетинакс, текстолит и стеклотекстолит.

Гетинакс – это прессованный материал на основе бумаги и смолы бакелита.

Текстолит – это прессованный материал на основе ткани и бакелита.

Гетинакс и текстолит выпускаются в виде листовых материалов и применяются для изготовления различных изоляционных перегородок и вспомогательных конструктивных элементов в электрических машинах и коммутационных аппаратах.

Стеклотекстолит получают при прессовании стекловолокна со смолами (эпоксидными и другими). Этот материал применяется как основа для печатных плат в электронной промышленности.

9.3. Асбест

Асбест – это неорганический волокнистый материал минерального происхождения, добываемый из горных пород.

Внешне асбест представляет собой мягкий на ощупь материал светло-серого оттенка. Главное преимущество асбеста – высокая нагревостойкость до 500 °С. Асбест негорюч и плавится при температуре 1150 °С.

Недостатки асбеста: высокая гигроскопичность и канцерогенность его волокон. При попадании в легкие человека эти волокна могут вызывать онкологические заболевания. Таким образом, при работе с асбестом нужно обязательно защищать органы дыхания респиратором.

Асбест применяется для электро- и теплоизоляции в нагревательных печах, где может подвергаться воздействию открытого пламени.

Асбест можно встретить в качестве наполнителя в таких композиционных материалах, как паронит и асбоцемент.

Асбоцемент – это композиционный материал, получаемый путем холодной прессовки цемента и асбеста. Из асбоцемента изготавливают трубы, используемые для прокладки силовых кабелей и проводов.

Глава 10. ТВЕРДЫЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

10.1. Керамические материалы

Керамическими называют неорганические материалы, подвергаемые обжигу после формовки.

Наиболее распространенным керамическим материалом, применяющимся в энергетике, является электротехнический фарфор.

Фарфор – это керамический материал на основе каолина, кварца и полевого шпата. Каолин представляет собой высококачественную светлую глину, кварц (SiO_2) добывают из песка, полевого шпата – ископаемый материал на основе алюмосиликатов. Таким образом, основными химическими элементами в составе фарфора являются кремний, алюминий и кислород.

Преимущества фарфора: низкая стоимость и высокая механическая прочность на сжатие. Недостатки: высокая гигроскопичность и слабая стойкость к ударным нагрузкам.

Электрические параметры фарфора не очень высокие (табл. 10.1). Так значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ у него довольно значительны, что свидетельствует о наличии в нем ощутимых токов утечки и диэлектрических потерь.

Таблица 10.1

Электрические характеристики фарфора

Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность, МВ/м	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · м	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	Длительно допустимая температура, °С
6–8	$(15–25)10^{-3}$	10–30	$10^{12}–10^{13}$	10^{13}	120

Для снижения гигроскопичности электротехнические изделия из фарфора обязательно покрывают глазурью.

Глазурь – это стеклоэмаль на поверхности фарфора. Глазурь наносится в жидком виде на поверхность фарфора и затем подвергается

ется обжигу. В результате фарфор покрывается гладким блестящим слоем, хорошо защищающим его от воздействий окружающей среды. Поэтому изделия из глазурованного фарфора могут использоваться на открытом воздухе, то есть в электроустановках открытого типа.

На сегодняшний день основные изделия из фарфора – изоляторы для низковольтных линий электропередачи, а также корпуса для высоковольтного оборудования: выключателей, разъединителей, измерительных трансформаторов, разрядников, вводов и др. Все эти изделия имеют волнообразную поверхность (рис. 10.1), что увеличивает путь протекания поверхностных токов утечки, и, соответственно, увеличивает значение поверхностного сопротивления.

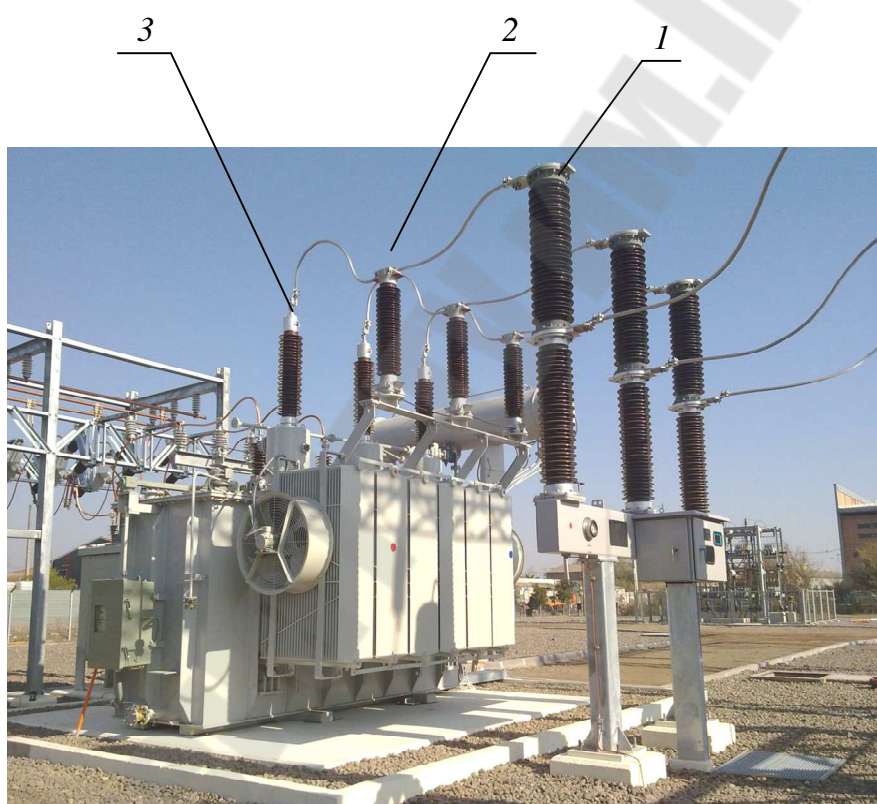


Рис. 10.1. Оборудование в фарфоровых корпусах:

- 1* – высоковольтный выключатель; *2* – ограничитель перенапряжений;
- 3* – высоковольтный ввод силового трансформатора

Существуют другие виды керамических электротехнических материалов, таких как радиофарфор, стеатит, ферриты. Они применяются в основном в электронной промышленности.

10.2. Неорганические стекла

Стекло – это полуморфный материал, получаемый путем резкого переохлаждения расплава некоторого оксида (кремния или бора).

Стекла на основе оксида кремния SiO_2 (кварца) называют **силикатными**. Они применяются для задач электротехники в большинстве случаев.

Силикатные стекла варят в стекловаренных печах с добавлением в расплавленный кварцевый песок химических реагентов: соды, поташа, известняка и др. Затем расплав резко охлаждают. Реагенты придают стеклам требуемые свойства.

Электрические свойства стекол существенно зависят от их типа и могут варьироваться в широких пределах (табл. 10.2).

Таблица 10.2

Электрические характеристики неорганического стекла

Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность, МВ/м	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · м	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	Длительно допустимая температура, °С
3,8–16,2	$(0,2–10)10^{-3}$	30–70	$10^6–10^{15}$	$10^5–10^{14}$	250

Для задач энергетики применяют следующие виды стекол: установочные, ламповые, конденсаторные, стеклоэмали, стекловолокно.

Установочные стекла обладают повышенной механической прочностью и используются для изготовления изоляторов низковольтных и высоковольтных линий электропередачи (рис. 10.2). Такие стекла имеют зеленый оттенок.

Форма стеклянных изоляторов формируется таким образом, чтобы увеличить путь протекания поверхностных токов утечки.

Ламповые стекла имеют значительную нагревостойкость, поэтому применяются для колб различных видов осветительных ламп как низкого, так и высокого давления. Эти стекла характеризуются также максимальной прозрачностью.

Конденсаторные стекла используются в качестве диэлектрика высоковольтных высокочастотных конденсаторов и имеют значительную диэлектрическую проницаемость.

Стеклоэмалями называются стекла, наносимые тонким слоем на поверхность керамических или металлических изделий с целью их защиты от воздействия окружающей среды.



а)



б)

Рис. 10.2. Изоляторы на основе электротехнического стекла:
а – низковольтные; б – высоковольтные

Стекловолокно – это тонкие (диаметром 4–7 мкм) нити, получаемые путем вытекания расплавленного стекла через отверстия нужного диаметра. Эти волокна имеют достаточную гибкость для формирования из них стеклотканей, стеклянных лент и шлангов.

Важной областью применения стекловолокна являются волоконно-оптические линии связи, в которых через нити стекловолокна, покрытые специальным отражающим слоем, пропускаются лазерные лучи. Волоконно-оптические кабели все чаще применяют в системах автоматизации и защиты электрических сетей.

10.3. Слюдяные материалы

Слюда – это минеральный материал, кристаллы которого имеют форму плоских пластин.

Слюда добывают из горных пород. Она бывает двух видов: мусковит и флогопит.

Мусковит – это бесцветная, зеленоватая или красноватая слюда (рис. 10.3, а).

Флогопит имеет янтарные, золотистые или коричневые оттенки (рис. 10.3, б).

Электрические характеристики слюды (табл. 10.3) приемлемы для задач электроэнергетики только при прикладывании напряжения перпендикулярно плоскости пластин.

Из табл. 10.3 видно, что электрические свойства мусковита несколько лучше, чем флогопита. При этом оба вида слюды имеют высший класс нагревостойкости «С».



Рис. 10.3. Слюда:
а – мусковит; б – флогопит

Таблица 10.3

Электрические характеристики слюды

Вид слюды	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность, МВ/м	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом · м	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	Длительно допустимая температура, °С
Мусковит	6–8	$150 \cdot 10^{-4}$	50–70	$10^{12}–10^{16}$	$10^6–10^8$	600
Флогопит	5–7	$500 \cdot 10^{-4}$	50–70	$10^{11}–10^{12}$	$10^6–10^8$	900

Слюда является компонентом для ряда композиционных материалов, использующихся в электроэнергетическом оборудовании.

Миканит – это композиционный материал, склеенный из пластинок слюды посредством клеящего лака или сухих смол.

Миканиты бывают коллекторными, прокладочными, формовочными, гибкими и микалентами.

Коллекторный миканит применяют в качестве изоляции между медными пластинами коллекторов электродвигателей (рис. 10.4). Его изготавливают из слюды флогопит, так как она истирается приблизительно с той же скоростью, что и твердая медь в процессе трения графитовых щеток о коллектор работающего электродвигателя.

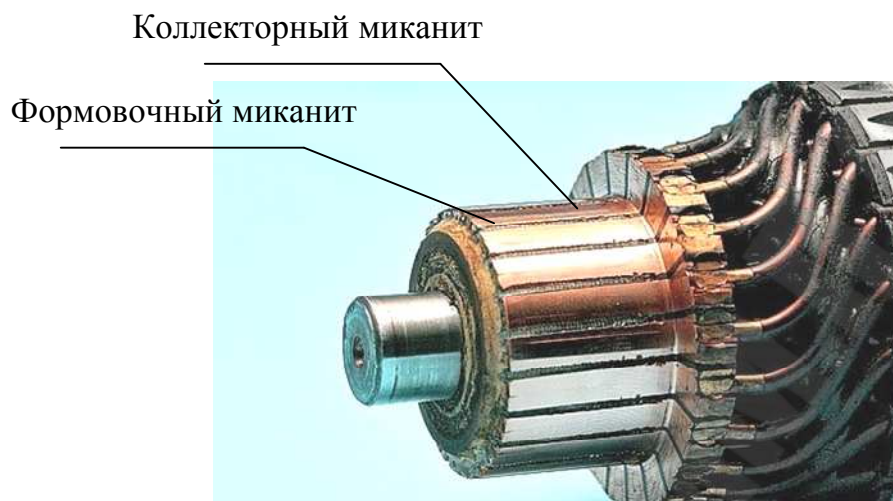


Рис. 10.4. Коллектор электродвигателя

Прокладочный миканит используют в качестве электроизоляционных прокладок или шайб в высоковольтных мощных электрических машинах.

Формовочный миканит при нагреве способен менять форму. Поэтому из него изготавливают различные фасонные изделия: коллекторные манжеты для изоляции коллектора от вала электродвигателя (рис. 10.4), фланцы, каркасы, трубки и др.

Гибкий миканит характеризуется повышенной гибкостью при нормальной температуре и, как правило, покрыт с двух сторон лакотканью или бумагой. Применяется он в качестве оберточной изоляции в электрических машинах.

Микалента – это тонкий миканит (толщиной около 0,1 мм), получаемый из одного слоя склеенных между собой пластинок слюды и покрытых с двух сторон стеклотканью. Микалента служит межвитковой изоляцией в мощных электрогенераторах.

Из отходов слюды изготавливают **слюдяные бумаги**, являющиеся альтернативой классическим миканитам.

Глава 11. ЖИДКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

11.1. Нефтяные электроизоляционные масла

Нефтяные электроизоляционные масла получают как одну из стадий процесса перегонки нефти. В электроэнергетическом оборудовании используют трансформаторное, кабельное и конденсаторное масла.

Трансформаторное масло – наиболее распространенный жидкий диэлектрик, применяющийся в высоковольтном оборудовании. 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 силовых (рис. 11.1) и измерительных трансформаторах, а также высоковольтных вводах трансформаторное масло выполняет две основные функции:

- жидкого диэлектрика, проникающего между полостями в твердой изоляции и увеличивающего ее электрическую прочность;
- охлаждающей среды, отводящей тепло от нагретых элементов оборудования благодаря тепловой конвекции при естественной или принудительной циркуляции.

В устройствах переключения силовых трансформаторов (устройства РПН), а также в высоковольтных выключателях трансформаторное масло используется как среда для гашения электрической дуги.

Основные недостатки трансформаторного масла:

- горючесть;
- высокая гигроскопичность;
- подверженность окислению и химическому старению при контакте с кислородом.

Для избегания указанных недостатков установки с трансформаторным маслом герметизируют.



Рис. 11.1. Элементы с трансформаторным маслом в высоковольтном силовом трансформаторе

В процессе эксплуатации возможна **регенерация** трансформаторного масла, то есть восстановление его свойств. Регенерация может включать три этапа:

- очистка от твердых частиц с помощью фильтров;
- очистка от мелких стальных частиц с помощью магнитов;
- сушка.

Сушка масла может осуществляться двумя способами:

- методом центрифугирования;
- пропуском масла через сорбенты.

В первом случае масло раскручивается в центрифуге и вода под действием центробежной силы вытесняется к периферии центрифуги, где откачивается. Во втором случае масло под давлением пропускается через силикагель – сорбент, интенсивно впитывающий влагу. Некоторые виды силикагелей могут менять цвет с синего на красный при увлажнении, что используется как индикатор в увлажненности масла силовых трансформаторов, где в специальную трубку, контактирующую с воздухом в расширителе, помещается силикагель, который можно наблюдать через смотровое окошко (рис. 11.1).

Регенерация масла может выполняться и непосредственно при эксплуатации трансформатора. Для этого на его баке закрепляются **термосифонные фильтры** (рис. 11.1), в которых находятся механические фильтры и силикагель. Через них непрерывно проходит масло из бака трансформатора, нагнетаемое маслососами.

Требования к электрической прочности трансформаторного масла зависят от рабочего напряжения электроустановки (табл. 11.1).

Таблица 11.1

Нормы электрической прочности трансформаторных масел

Для аппаратов с рабочим напряжением	Электрическая прочность, кВ/мм
До 15 кВ включительно	12
От 15 до 35 кВ включительно	14
От 60 до 150 кВ включительно	22
От 220 до 500 кВ	24
750 кВ	26

Горючесть трансформаторного масла характеризуется температурой вспышки и температурой самовоспламенения.

Температура вспышки – это температура масла, при которой загораются его пары при поднесении к ним пламени. Для качественного трансформаторного масла температура вспышки составляет не менее 135 °С.

Температура самовоспламенения – это температура масла, при которой оно самовозгорается без поднесения пламени. У трансформаторного масла эта температура должна быть не ниже 350 °С.

В условиях низких температур начинает увеличиваться вязкость масла. Слишком вязкое масло плохо отводит тепло от обмоток и магитопровода силового трансформатора.

Температура застывания – это температура масла, при которой его вязкость начинает превышать допустимое значение.

В процессе работы масло окисляется и его тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ возрастает. Для замедления старения масла в его состав вводят антиокислительные присадки, которые называются **ингибиторы**. Одним из самых распространенных ингибиторов является ионол.

Значения параметра $\text{tg}\delta$ часто используемых марок трансформаторных масел приведены в табл. 11.2.

Значения tgδ трансформаторных масел

Марка масла	Метод получения	Ингибитор	Область применения	tgδ
ТКп	Кислотно-щелочная очистка	Ионол	до 500 кВ	0,022
Т-1500	Фенольная очистка	Ионол	до 220 кВ	0,005
ГК	Гидрокрекинг	Ионол	330 кВ и выше	0,005
ВГ	Гидрокаталитические процессы	Ионол	330 кВ и выше	0,005

Общее содержание кислот в масле оценивается **кислотным числом**, которое равно массе едкого калия (формула – KOH), необходимого для нейтрализации всех кислот, находящихся в масле. Так для трансформаторного масла кислотное число должно находиться в пределах от 0,03 до 0,1 г KOH/кг.

Процесс определения концентрации посторонних веществ в нефтяном масле называется **хроматографическим анализом**, а приборы, применяющиеся для этих целей, хроматографами.

В отечественной энергосистеме наиболее широко применяется трансформаторное масло марки ТКп.

Кабельное масло предназначено для пропитки бумажной изоляции высоковольтных кабелей, существенно повышая ее электрическую прочность. Это масло характеризуется повышенной вязкостью, так как не должно стекать вниз кабеля под действием гравитации.

Конденсаторное масло служит для пропитки бумажных диэлектриков силовых конденсаторов, что увеличивает диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность этих диэлектриков.

11.2. Электроизоляционные лаки и компаунды

Лак – это жидкий диэлектрик, состоящий из лаковой основы и растворителя. Лаковая основа изготавливается на основе смол, битумов или высыхающих масел. Растворитель является летучим веществом, испаряющимся на воздухе. После испарения растворителя лаковая основа переходит в твердое состояние.

По области применения лаки бывают пропиточные, покрывные и клеящие.

Пропиточные лаки предназначены для пропитки волокнистой изоляции (бумага, картон, ткань и другие) с целью повышения ее

электрической прочности и теплопроводности. После пропитки и испарения растворителя поры изоляции оказываются заполненными лаковой основой.

Покрывные лаки используются для образования влагостойкой пленки с низкой адгезионной способностью на поверхности твердой изоляции или металлов. Получившаяся после высыхания лака пленка имеет несмачиваемую поверхность, к ней затруднено прилипание грязи. В результате удельное поверхностное сопротивление изоляции значительно возрастает.

Разновидностью покрывных лаков являются **пигментированные эмали**. Пигменты изготавливаются на основе оксидов металлов и придают лаку определенную окраску, а также улучшают механическую прочность образующейся пленки. При этом электроизоляционные свойства лаковой пленки несколько снижаются.

Пигментированные эмали применяются для покрытия медных обмоточных проводов обмоток низковольтных электрических машин.

Окрасочные пигментированные эмали (так называемые краски) бывают двух основных типов: пентафталевые и масляные. Они предназначены для окраски стальных элементов электроустановок.

Клеящие лаки применяются для склеивания между собой твердых электроизоляционных материалов. Например, пластинок слюды при изготовлении миканитов. Одно из основных требований к таким лакам – высокая адгезия лаковой основы к склеиваемым поверхностям.

Компаунд – это аморфный диэлектрик на основе различных смол, битумов, масел. В отличие от лаков компаунды не содержат растворителя и в исходном состоянии являются твердыми. Перед употреблением компаунды разогревают до жидкого состояния. Компаунды бывают пропиточные и заливочные.

Пропиточные компаунды используются аналогично пропиточным лакам, но для более значительных объемов пропитываемой изоляции.

Заливочные компаунды предназначены для заполнения значительных полостей между элементами различных электротехнических устройств: трансформаторов, электродвигателей, коммутационных аппаратов. Например, в последние десятилетия масляные измерительные трансформаторы напряжения класса 10 кВ заменяются трансформаторами с литой изоляцией (рис. 11.2, а) типа ЗНОЛ (буква «Л» означает наличие литой изоляции). Также с литой изоляцией выпускаются и измерительные трансформаторы тока (рис. 11.2, б).



а)



б)

Рис. 11.2. Измерительные трансформаторы с литой изоляцией:
а – трансформатор напряжения ЗНОЛ-10; б – трансформатор тока ТОЛ-10

Заливочные компаунды применяются в конструкциях некоторых видов соединительных, ответвительных и концевых муфт для высоковольтных силовых кабелей.

Основное требования к заливочным компаундам – термореактивность, то есть после заливки и остывания их температура плавления должна существенно возрастать.

Глава 12. ГАЗООБРАЗНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

В электроэнергетическом оборудовании применяются следующие виды газов: воздух, азот, водород, элегаз, инертные газы.

Свойства газов по отношению к свойству воздуха (в относительных единицах) приведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Свойства газов по отношению к свойствам воздуха

Характеристика	Воздух	Азот	Водород	Элегаз
Плотность	1	0,97	0,07	5,19
Теплопроводность	1	1,02	6,69	0,7
Удельная теплопроводность	1	1,05	14,4	0,59
Электрическая прочность	1	1	0,6	2,3

Воздух – это смесь газов, состоящая из азота (78 %), кислорода (21 %), аргона (0,9 %), углекислого газа (0,03 %) и других газов.

Воздух является естественным изолятором для воздушных линий электропередачи и вводов в электрооборудование посредством неизолированных проводов. Также воздух выполняет функцию дополнительной изоляции между элементами внутри электрооборудования.

Главный недостаток воздуха – наличие кислорода, то есть газа, активно окисляющего и разрушающего большинство видов материалов. Также к недостаткам воздуха относится низкое значение его электрической прочности: 1–5 МВ/м при нормальном давлении.

Азот по электрическим характеристикам близок к воздуху, однако выгодно отличается от него отсутствием окисляющей способности.

Азот применяется в качестве изолирующего слоя, способного сжиматься, в герметичном оборудовании. Для примера можно привести силовые трансформаторы типа ТМЗ (Т – трехфазный; М – маслонаполненный; З – закрытого типа) (рис. 12.1, а).

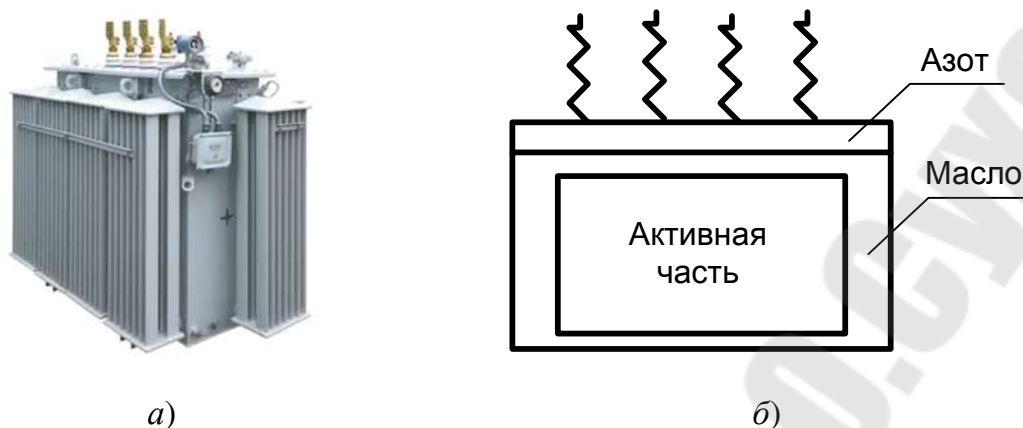


Рис. 12.1. Силовой трансформатор типа ТМЗ:
а – внешний вид; *б* – конструкция

В таком трансформаторе отсутствует расширитель для масла. Функцию расширителя и одновременно защитного слоя от влияния кислорода выполняет азот, заполняющий верхнюю часть бака трансформатора (рис. 12.1, *б*).

Водород отличается от остальных газов относительно высокой теплопроводностью, поэтому применяется в качестве охлаждающей среды в мощных электрогенераторах. Двигаясь через вращающийся ротор генератора, этот газ практически не создает сопротивления вращению и при этом отводит тепло посредством конвекции.

Основной недостаток водорода – его взрывоопасность при смеси с воздухом. Поэтому установки с водородным охлаждением должны быть хорошо герметизированы.

Элегаз – это гексафторид серы SF_6 . Название «элегаз» является сокращением от слов «электричество» и «газ». Среди всех газов элегаз характеризуется наибольшей электрической прочностью (в 2,5 раза больше, чем у воздуха при нормальном давлении), хорошей способностью гашения электрической дуги. Также он нетоксичен и негорюч.

Элегаз при повышенном давлении применяется в качестве герметизатора и изолятора в различном оборудовании как альтернатива азоту. Например, в высоковольтных КРУЭ – комплектных распределительных устройствах элегазовых (рис. 12.2, *а*).



а)



б)

Рис. 12.2. Оборудование с применением элегаза:
а – КРУЭ 110 кВ; б – высоковольтный выключатель 110 кВ

Внутри корпуса КРУЭ, заполненного элегазом, находятся высоковольтные выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы и шины проводников.

Элегаз присутствует также в камерах для гашения электрической дуги высоковольтных элегазовых выключателей (рис. 12.2, б).

Инертные газы, такие как аргон или ксенон, вместе с парами ртути заполняют колбы газоразрядных ламп низкого или высокого давления. Подобные смеси легко ионизируются при относительно невысоком напряжении и затем поддерживают необходимую электропроводящую среду внутри лампы.

Глава 13. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводниковыми называют материалы, имеющие два типа электропроводности: электронную (n -типа) и дырочную (p -типа). По электропроводности полупроводники находятся между проводниками и изоляционными материалами.

Собственные полупроводники обладают почти в равной мере обеими типами проводимости – электронной и дырочной. К простым собственным полупроводникам относятся: кремний, германий, бор, фосфор, мышьяк, сера, селен, теллур, йод. Сложными собственными полупроводниками являются такие соединения, как антимонид индия InSb , арсенид галлия GaAs и многие другие.

Примесные полупроводники за счет дополнительных примесей имеют явно выраженные проводимости n -типа или p -типа. Например, если в кремний добавить фосфор, то возникнет избыток электронов в кристаллической решетке (рис. 13.1, a), так как кремний имеет четыре электрона на внешней оболочке атома, а фосфор – пять электронов. Избыточные электроны становятся свободными носителями зарядов и обуславливают электронную электропроводность полупроводника. В этом случае фосфор называется **донором**.

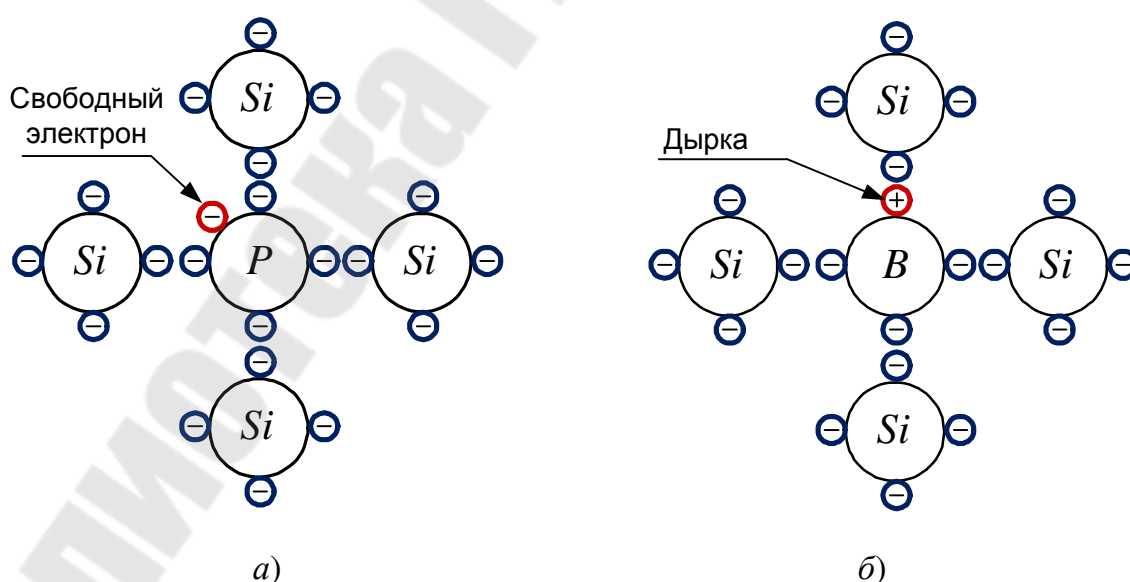


Рис. 13.1. Кристаллические решетки примесных полупроводников:
 a – n -типа; b – p -типа

Если в кремний добавить бор, то возникнет недостаток электронов в кристаллической решетке (рис. 13.1, б), так как бор имеет три электрона на внешней оболочке атома. Образующиеся при этом свободные энергетические уровни для электронов условно считаются положительными частицами, которые называются дырки. Под действие внешнего электрического поля электроны перемещаются по кристаллу получившегося полупроводника, постоянно занимая места дырок. При этом условно считается, что движутся не электроны, а дырки, то есть имеет место дырочный тип электропроводности. В данном случае бор называется **акцептором**.

На границе соединения полупроводников n -типа и p -типа образуется физическое явление, которое называется **$p-n$ переход**. Основными свойствами данного явления являются:

- способность проводить ток в прямом направлении значительно лучше, чем в обратном направлении;
- способность переносить заряды от соседних $p-n$ переходов под действием электрического поля.

Эти свойства обусловили появление полупроводниковых электронных компонентов, таких как транзисторы, диоды и тиристоры, являющихся основой для построения всех современных электронных устройств. Главным материалом для них является чистый монокристаллический кремний, который добывают из расплавленного очищенного кварцевого песка.

Для задач энергетики у $p-n$ перехода есть еще два важных свойства:

- способность генерировать ЭДС под действием света;
- способность излучать свет при протекании прямого тока.

Первое свойство используется для создания фотоэлементов и фотоэлектрических модулей (рис. 13.2, а).

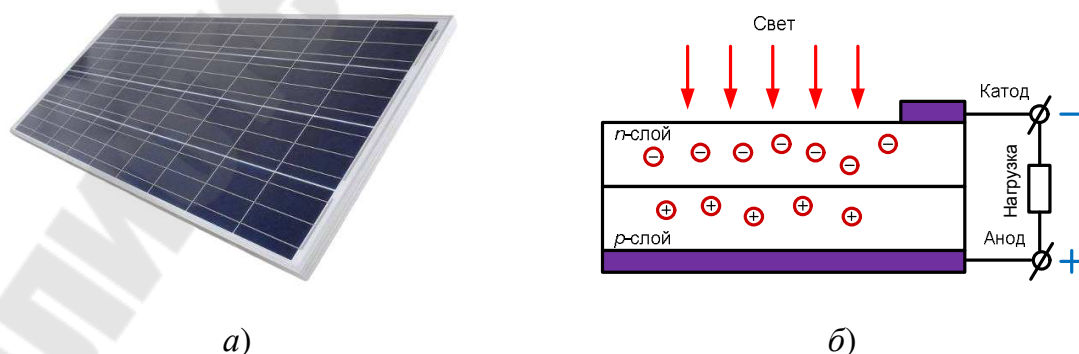


Рис. 13.2. Полупроводниковые устройства на основе фотоЭДС:
а – фотоэлектрический модуль; б – конструкция фотоэлемента (упрощенно)

Фотоэлементы работают следующим образом. При попадании света на верхний полупроводник n -типа (катод) происходит выбивание электронов из атомов фотонами (фотоэффект). В результате концентрация электронов в этом слое значительно возрастает, что приводит к росту разности потенциалов между электродами, то есть формируется фотоЭДС (рис. 13.2, б). Под действием быстрых электронов сопротивление p - n перехода снижается, и он начинает проводить ток в обратном направлении от n -слоя к p -слою.

Один фотоэлемент способен выдать напряжение не выше 0,65 В. Поэтому в фотоэлектрических модулях несколько десятков фотоэлементов соединяют последовательно для получения более высокого напряжения.

Основным материалом для производства фотоэлементов также является кремний.

Если через p - n переход протекает прямой ток, то есть от p -слоя к n -слою, то на границе соединения полупроводников происходит **рекомбинация** – взаимное соединение электронов и дырок с выделением избытка энергии в виде фотонов. Таким образом в p - n переходе образуется свечение (рис. 13.3, а).

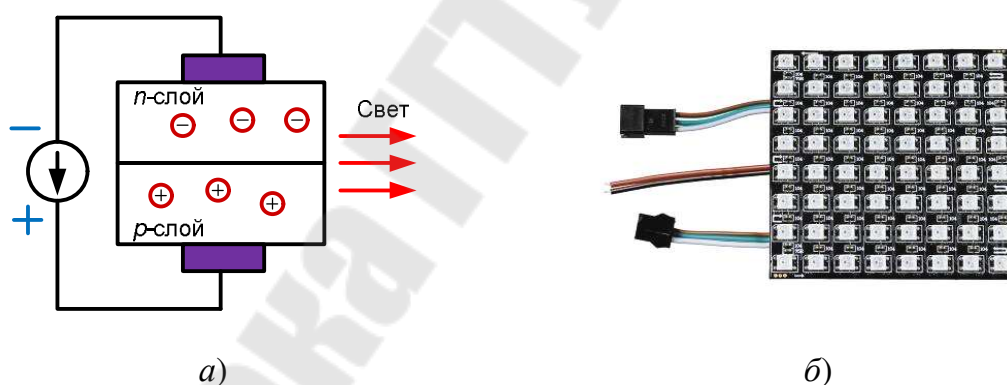


Рис. 13.3. Полупроводниковые устройства на основе фотоизлучения: а – конструкция светодиода (упрощенно); б – матрица светодиодов для светильника

Способность p - n перехода излучать свет используется при создании светодиодов, которые находят различные области применения, в том числе и как экономичные источники света (рис. 13.3, б).

При производстве светодиодов используют сложные полупроводники: нитрид галлия GaN, арсенид галлия GaAs и др.

Рассмотрим зависимость удельного сопротивления полупроводника от температуры. Из теории полупроводников известно, что их

удельная проводимость γ определяется по формуле

$$\gamma = Ae^{-\frac{W}{2k\theta}}, \quad (13.1)$$

где A – коэффициент, зависящий от заряда электрона, концентрации и скорости электронов и дырок в полупроводнике; W – энергия запрещенной зоны на внешней оболочке атома полупроводника; k – постоянная Больцмана; θ – температура.

Тогда очевидно, что удельное сопротивление полупроводника ρ будет равно:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{A} e^{\frac{W}{2k\theta}}. \quad (13.2)$$

Из формулы (13.2) следует, что при возрастании температуры сопротивление полупроводника снижается (рис. 13.4).

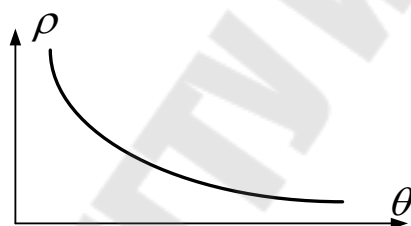
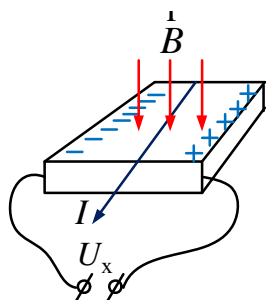


Рис. 13.4. Зависимость удельного сопротивления полупроводника от температуры

Эта зависимость учитывается при изготовлении полупроводниковых датчиков температуры, которые называются **термисторы**.

В некоторых современных измерительных приборах для задач энергетики может применяться эффект Холла. Рассмотрим этот эффект.

Если полупроводниковую пластину поместить в магнитное поле и пропустить через нее постоянный ток (рис. 13.5, *a*), то на ее противоположных сторонах появится ЭДС. Этот эффект называется **эффектом Холла**.



а)



б)

Рис. 13.5. Эффект Холла:

а – условия формирования ЭДС Холла; б – токовые клещи с датчиками Холла

ЭДС Холла U_x определяется по формуле

$$U_x = K_x IB \sin \alpha, \quad (13.3)$$

где K_x – коэффициент Холла, зависящий от заряда электрона, высоты пластины и концентрации электронов в пластине; I – ток, протекающий вдоль пластины; B – магнитная индукция внешнего магнитного поля; α – угол между плоскостью пластины и линиями магнитной индукции.

Из формулы (13.3) следует, что ЭДС Холла пропорциональна магнитной индукции. Благодаря этому свойству создают датчики магнитного поля, приборы для нахождения скрытой электропроводки, токоизмерительные клещи (рис. 13.5, б) и датчики тока, позволяющие измерять как переменный, так и постоянный ток.

Глава 14. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проводниковыми называют материалы, обладающие удельным электрическим сопротивлением от 0,016 до 10 мкОм·м.

Самыми лучшими известными проводниками являются серебро (0,016 мкОм·м), медь (0,017 мкОм·м), золото (0,024 мкОм·м), алюминий (0,016 мкОм·м).

Проводниковые материалы бывают высокой проводимости (от 0,016 до 0,05 мкОм·м), средней проводимости (от 0,05 до 0,3 мкОм·м) и высокого сопротивления (от 0,3 до 50 мкОм·м).

К проводникам высокой проводимости относятся только чистые металлы, а к остальным – металлы и сплавы.

14.1. Некоторые физические явления в проводниках

Основным уравнением, описывающим свойства проводников в трехмерном пространстве, является **закон Ома в дифференциальной форме**:

$$\vec{J} = \gamma \vec{E}, \quad (14.1)$$

где \vec{J} – вектор плотности тока через проводник; γ – удельное сопротивление проводника; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля вокруг проводника.

Уравнение (14.1) является дифференциальным, так как плотность тока представляет собой скорость изменения тока через сечение проводника, а напряженность электрического поля равна градиенту трехмерного потенциала поля, взятому с обратным знаком. В связи с этим уравнение (14.1) можно записать в виде:

$$\frac{d\vec{I}}{dS} = -\gamma \cdot \text{grad} \phi = -\gamma \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right), \quad (14.2)$$

где \vec{I} – вектор тока в проводнике; S – площадь сечения проводника; ϕ – вектор электрического потенциала в проводнике; x, y, z – координаты трехмерного пространства.

Для задач энергетики в большинстве случаев уравнение (14.2) принято рассматривать в одномерном пространстве вдоль проводни-

ка. Если проводник также считать однородным, то дифференциалы d и ∂ можно заменить конечными приращениями Δ , и уравнение (14.2) преобразуется к виду:

$$\frac{\Delta I}{\Delta S} = -\gamma \frac{\Delta \varphi}{\Delta x}. \quad (14.3)$$

Обозначив $\Delta I = I$, $\Delta S = S$, $\Delta \varphi = -U$, $\Delta x = l$, получим:

$$\frac{I}{S} = \gamma \frac{U}{l}, \quad (14.4)$$

где U – падение напряжения на проводнике; l – длина проводника.

Преобразовав выражение (14.4), приходим к традиционной форме записи закона Ома:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{S} = R, \quad (14.5)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление проводника, Ом · м; R – электрическое сопротивление проводника.

Рассмотрим зависимость удельного сопротивления проводника от температуры (рис. 14.1).

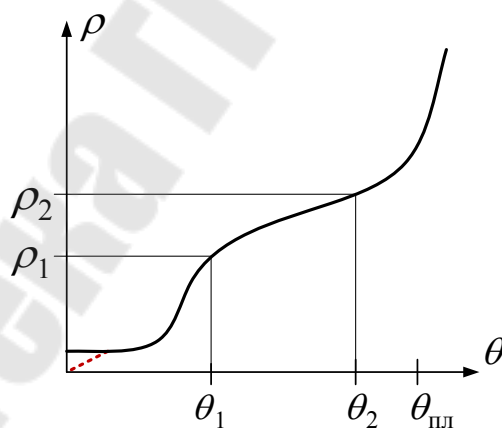


Рис. 14.1. Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры

Как было показано в главе 2, удельное сопротивление проводника ρ возрастает с ростом температуры. При очень низких температурах, близких к абсолютному нулю, сопротивление проводника очень мало и практически не зависит от температуры. Однако у многих проводников может наблюдаться явление сверхпроводимости, ко-

гда их сопротивление снижается до очень малого, не поддающегося измерению значения (показано пунктиром на рис. 14.1).

При дальнейшем росте температуры сопротивление проводника резко возрастает. Затем скорость возрастания замедляется, и между температурами θ_1 и θ_2 зависимость приблизительно линейная и описывается формулой

$$\rho_2 = \rho_1(1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)), \quad (14.6)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления при температурах θ_1 и θ_2 ; α – температурный коэффициент удельного сопротивления.

На основе зависимости (14.6) создают проводниковые датчики температуры, которые называют также **термометрами сопротивления**. Для этих датчиков применяют медь или платину, как имеющие наиболее линейную зависимость сопротивления от температуры.

При достижении температуры плавления $\theta_{пл}$ проводник переходит в жидкое состояние, его кристаллическая решетка разрушается, и сопротивление резко возрастает.

Следующим важным явлением, применяющимся для задач энергетики, является **явление термоЭДС** – возникновение разности потенциалов между соединенными проводниками из разных материалов. Значение термоЭДС существенно зависит от температуры, при которой находится место контакта проводников. Чем выше температура, тем выше значение термоЭДС. На базе этого явления создают датчики температуры, которые называют **термопары**.

Для термопар существуют специальные сплавы:

- хромель (90 % Ni, 10 % Cr);
- копель (56 % Cu, 44 % Ni);
- алюмель (90 % Ni, остальное Al, Si, Mg);
- платинородий (90 % Pt, 10 % Rh);
- константан (60 % Cu, 40 % Ni).

Наилучшие комбинации металлов и сплавов для термопар:

- хромель–копель;
- медь–константан;
- медь–копель;
- хромель–алюмель.

Термопара при комнатных температурах генерирует ЭДС в несколько мВ, однако при воздействии открытого пламени это значение может достигать единиц вольт, что оказывается достаточным для пи-

тания катушек небольших реле и других маломощных устройств.

Далее рассмотрим также важное для вопросов энергетики явление – поверхностный эффект.

Поверхностный эффект (скин-эффект) – это явление вытеснения переменного тока на поверхность проводника. Данное явление связано с возникновением вихревых токов в толще проводника под действием внешнего переменного электромагнитного поля. Вихревые токи противодействуют изменению тока внутри проводника и способствуют его изменению вблизи поверхности (рис. 14.2, а).

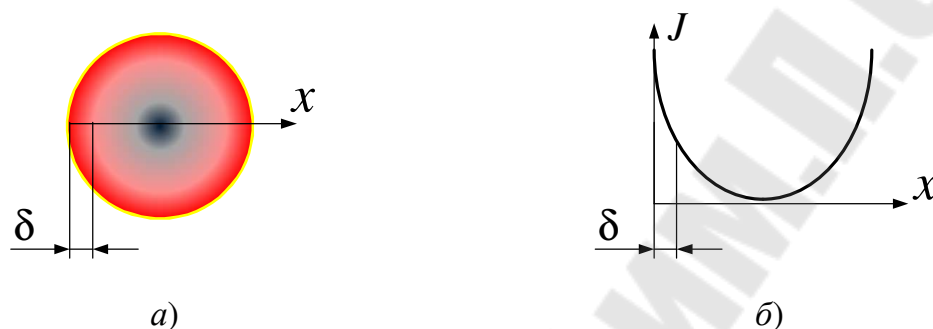


Рис. 14.2. Поверхностный эффект:

а – изменение плотности тока по сечению проводника;

б – график плотности тока

Изменение плотности тока по сечению проводника характеризуется **эффективной глубиной проникновения тока** δ (рис. 14.2, б), равной расстоянию от края проводника до той области, где значение плотности тока снижается в $e \approx 2,71$ раз. Величина δ определяется по формуле

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \mu \gamma f}}, \quad (14.7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость материала; γ – удельная электропроводность материала; f – частота тока.

Из формулы (14.7) следует, что чем сильнее взаимодействие проводника с магнитным полем или чем выше частота тока, тем сильнее проявляется поверхностный эффект. Для меди и алюминия этот эффект проявляется незначительно, а в железе, наоборот, его влияние очень существенно. Так, если подставить необходимые значения величин в формулу (14.7), то на частоте 50 Гц для меди

$\delta = 9,3$ мм, а для железа $\delta = 0,7$ мм. Это значит, что если диаметр медного проводника меньше 18 мм, то поверхностный эффект практически никак не влияет на его сопротивление. В железном (стальном) проводнике поверхностный эффект будет существенно влиять на его сопротивление на переменном токе.

На практике поверхностный эффект приводит к дополнительному нагреву проводов от влияния высших гармонических составляющих тока, а также к дополнительному нагреву трансформаторов и других электрических машин из-за образования вихревых токов в их магнитопроводах (сердечниках).

14.2. Медь и материалы на ее основе

Чаще всего медь получают путем переработки сульфидных руд, добываемых в горных породах (рис. 14.3, а).



а)



б)

Рис. 14.3. Медь:

а – сульфидная руда; б – готовые изделия

После нескольких плавов руды и обжигов с интенсивным дутьем медь, предназначенная для электротехники, обязательно проходит процесс электролитической очистки. Полученные после электролиза катодные пластины меди переплавляют в болванки, которые затем прокатывают и протягивают в изделия требуемого поперечного сечения. Изготовленная таким способом медь имеет степень чистоты не менее 99,9 %. Цвет чистой меди – темно-оранжевый с характерным блеском.

При холодной протяжке медных болванок получают **твердую медь**, характеризующуюся повышенным пределом прочности и способностью слегка пружинить. Если же медь подвергать отжигу с по-

следующим охлаждением, то образуется **мягкая медь**, которая пластична и имеет невысокую механическую прочность.

Твердая медь используется для изготовления контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин.

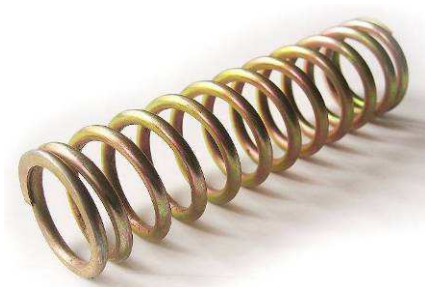
Мягкая медь в виде проволоки применяется в качестве токопроводящих жил проводов и кабелей, а также обмоточных проводов.

Преимущества меди заключаются не только в ее высокой проводимости, но и в хорошей контактирующей способности. При взаимодействии с кислородом воздуха медь покрывается тонкой пленкой оксида CuO , которая незначительно влияет на область контакта с другим медным проводником. При длительном воздействии кислорода и влаги наблюдается незначительная коррозия меди, проявляющаяся потемнением ее поверхности. Такую медь перед эксплуатацией обязательно необходимо очищать.

Сплавы меди с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием называются **бронзы**. При правильно подобранном составе бронзы обладают значительно более высокими механическими свойствами, чем чистая медь, но значительно уступают ей по электропроводности. По цвету бронзы выглядят светлее меди и с различными оттенками желтого и оранжевого.

Бронзы широко применяют для изготовления токопроводящих пружин (рис. 14.4, *а*) и других проводниковых изделий вспомогательного характера. Кадмиевую бронзу используют для контактных проводов и коллекторных пластин особо ответственного назначения. Еще большей механической прочностью обладает бериллиевая бронза.

Сплав меди с цинком называется **латунь**. Этот сплав обладает повышенным по сравнению с чистой медью пределом прочности при растяжении. Поэтому латунь применяют в электротехнике для изготовления всевозможных контактов (рис. 14.4, *б*), зажимов и других изделий. Цвет латуни – темно-желтый.



а)



б)

Рис. 14.4. Изделия из сплавов на основе меди:
а – бронзовая пружина; б – латунные контакты

Для изготовления резисторов используются сплавы манганин и константан.

Манганин – это сплав меди (85 %), марганца (12 %) и никеля (3 %). Его название происходит от латинского *manganum* – марганец.

Манганин имеет коричневый цвет (рис. 14.5, а) и выпускается, как правило, в виде проволок различного сечения.



а)



б)

Рис. 14.5. Манганин (а) и константан (б)

Константан – это сплав меди (60 %) и никеля (40 %). Это название объясняется значительным постоянством сопротивления материала при изменении температуры.

Константан имеет светло-коричневый цвет (рис. 14.5, б) и выпускается в виде полос и лент различного сечения.

Манганин и константан удобны для изготовления резисторов, в том числе и высокоточных (прецизионных), так как обладают удельным сопротивлением около $0,5 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, то есть относятся к проводникам высокого сопротивления. Температурный коэффициент сопро-

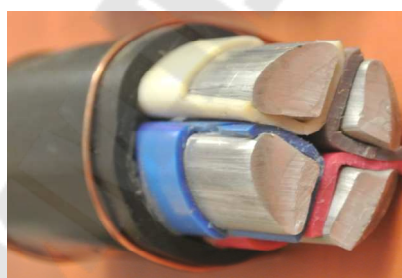
тивления этих материалов составляет порядка 10^{-5} 1/К, тогда как у чистой меди этот параметр равен $4,3 \cdot 10^{-3}$ 1/К. Это значит, что сопротивление резисторов, изготовленных из манганина или константана, будет изменяться слабее в 430 раз по отношению к меди при изменении температуры.

14.3. Алюминий и материалы на его основе

Алюминий добывают из бокситов – алюминиевых руд (рис. 14.6, а).



а)



б)

Рис. 14.6. Алюминий:

а – бокситовая руда; б – кабель с алюминиевыми жилами

Внешне алюминий – материал светло-серого цвета с характерным блеском (рис. 14.6, б). На ощупь алюминий гладкий и легкий.

Как и в случае с медью бывает твердый и мягкий алюминий. Области применения этих видов алюминия аналогичны областям применения соответствующих видов меди.

Если рассматривать изделия одинакового объема, то по электропроводности алюминий в 1,63 раза уступает меди, а по массе в 3,3 раза легче ее. Это значит, что для того, чтобы получить сопротивление алюминиевого провода, равное сопротивлению медного провода, необходимо увеличить сечение алюминиевого провода в 1,63 раза, то есть диаметр провода нужно увеличить в $\sqrt{1,63} \approx 1,3$ раза. Однако даже при таких условиях алюминиевый провод будет в 2 раза легче медного.

Еще одним преимуществом алюминия перед медью является его более низкая стоимость. Так, в 2024 г. медь была приблизительно в 3,8 раза дороже алюминия.

По механическим свойствам алюминий значительно уступает меди. Предел прочности на растяжение у меди в 3,5 раза выше, а ее модуль упругости в 1,7 раза выше, чем у алюминия.

При взаимодействии с кислородом воздуха алюминий покрывается оксидной пленкой Al_2O_3 , хорошо предохраняющей его от коррозии, однако имеющей повышенное сопротивление. Поэтому по контактирующей способности алюминий уступает меди. Места алюминиевых контактов, выполненные болтовыми соединениями, зажимами или скручиванием являются источником повышенных потерь электроэнергии в электрических сетях.

Взаимных контактов медных и алюминиевых проводников желательно избегать. При попадании влаги в область такого контакта возникает местная гальваническая ЭДС, приводящая к разрушению алюминиевого проводника коррозией. Если же избежать такого контакта не удастся, тогда область контакта необходимо покрыть лаком или герметизировать иными способами.

В целом необходимо отметить, что в отечественной энергосистеме для линий электропередачи алюминий используется значительно чаще меди, однако в последние десятилетия предпочтение для этих целей отдают меди (особенно в западных странах), как материалу более прочному и позволяющему снизить потери электроэнергии в электрических сетях.

14.4. Железо и материалы на его основе

Железо добывают из железных руд (рис. 14.7, а).

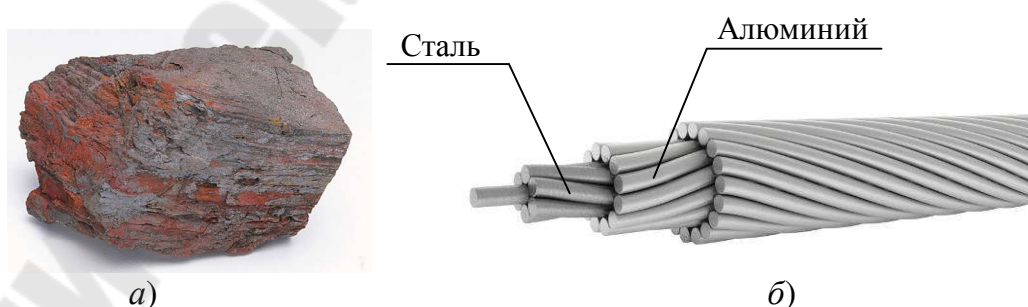


Рис. 14.7. Железная руда (а) и сталеалюминиевый провод (б)

Чистое железо характеризуется слабой пластичностью при обработке, поэтому на практике применяют сплав железа с углеродом, который называется **сталь**.

Внешне новая сталь имеет светло-серый цвет с незначительным блеском (рис. 14.7, б). По сравнению с алюминием она несколько темнее.

Как проводник сталь значительно уступает меди и алюминию, являясь проводником средней проводимости. Ее удельное электрическое сопротивление около $0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, что в 6 раз выше, чем у меди.

По плотности сталь близка к плотности меди, однако предел прочности при растяжении у стали приблизительно в 4 раза больше, чем у меди.

Если сталь использовать как проводниковый материал, то в ней помимо естественных потерь электроэнергии из-за повышенного сопротивления будут возникать дополнительные потери, вызываемые поверхностным эффектом, вихревыми токами и перемагничиванием.

К недостаткам стали относятся ее значительная коррозия при взаимодействии с кислородом воздуха. Только у нержавеющей стали эти процессы значительно слабее.

Главные преимущества стали: низкая стоимость (в 2024 г. сталь в 25 раз дешевле меди) и высокая механическая прочность.

Как проводниковый материал сталь применяется в системах заземления и молниезащиты, а также в электропроводящих рельсах электротранспорта. В металлических опорах линий электропередачи сталь в первую очередь используется как конструкционный материал, однако при разряде молнии в стальной молниезащитный трос (рис. 14.8) ток протекает по тросу, ближайшим опорам, их контурам заземления и далее в землю.

Для высоковольтных воздушных линий электропередачи применяют сталеалюминиевые провода (рис. 14.7, б), в которых центральная часть выполняется из стали и предназначена для удерживания необходимых механических нагрузок.



Рис. 14.8. Опора высоковольтной линии электропередачи

Сталь применяется также для изготовления **биметалла** – композиционного материала, состоящего из плотно соединенных стальной и медной пластин. При протекании через него тока и нагревании биметалл начинает изгибаться, так как у меди и стали различные температурные коэффициенты линейного расширения – медь расширяется быстрее железа. Этот эффект используют в тепловых реле, предназначенных для защиты оборудования от перегрузок, а также для управления электронагревательными устройствами: утюгами, электрочайниками и др.

На основе стали получают сплав, который называется **нихром**. Он состоит из никеля (около 60 %), железа (около 23,5 %), хрома (около 15 %) и марганца (около 1,5 %).

Нихром имеет серый цвет без блеска. Его предельная рабочая температура достигает 1000 °С. Удельное электрическое сопротивление приблизительно равно 1,2 мкОм · м, то есть нихром является проводником высокого сопротивления.

Нихром применяется для изготовления нагревательных спиралей в утюгах, электрочайниках, водонагревателях и других электро-

нагревательных устройствах. Также из нихрома изготавливают мощные переменные резисторы – реостаты.

Главный недостаток нихрома – существенное разрушение при взаимодействии с кислородом воздуха при высокой температуре. Поэтому электронагревательные изделия из этого материала обязательно должны герметизироваться. Так, трубки с нихромовыми нагревательными спиралями заполняются порошком диэлектрика с высокой теплопроводностью, таким как магнезия MgO .

14.5. Вольфрам

Вольфрам среди всех металлов обладает наивысшей температурой плавления, составляющей $3380\text{ }^{\circ}C$. Внешне это тяжелый металл серого цвета без блеска (рис. 14.9, а).

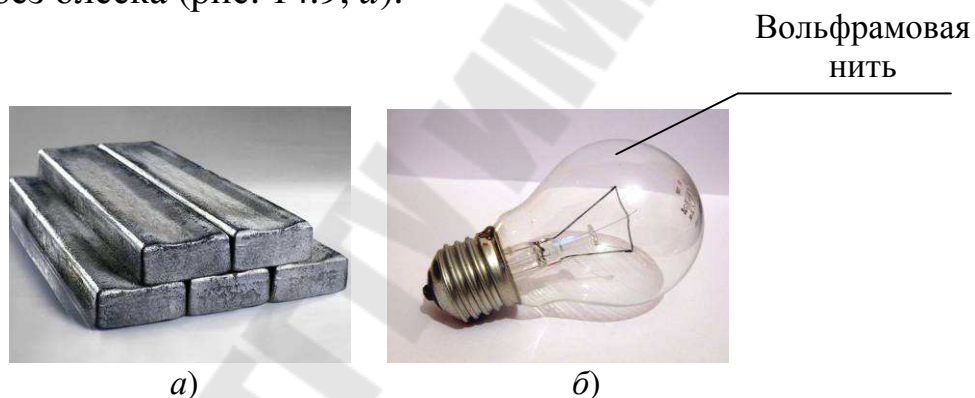


Рис. 14.9. Вольфрам (а) и лампа накаливания с вольфрамовой нитью (б)

В случае работы при температурах выше $2000\text{ }^{\circ}C$ вольфрам сильно окисляется кислородом и разрушается. Поэтому в таких условиях он должен находиться либо в вакууме, либо в среде инертных газов (аргона и др.).

Помимо высокой температуры плавления к преимуществам вольфрама относятся высокая устойчивость к механическому истиранию и способность противостоять действию электрической дуги.

Вольфрам имеет две основные области применения:

- нити для ламп накаливания;
- контакты коммутационных аппаратов.

14.6. Олово и свинец

Олово и свинец – металлы, характеризующиеся низкой температурой плавления: 232 °С у олова и 327 °С у свинца. Это обуславливает их основную область применения в электротехнике: **оловянно-свинцовые припои** – сплавы, применяющиеся для пайки медных или алюминиевых контактов.

14.7. Графит

Графит – это неметаллический проводниковый материал, изготавливаемый из каменноугольной смолы с последующим обжигом. Основным компонентом графита – углерод.

Графит имеет черный цвет и может быть достаточно твердым на ощупь. Удельное электрическое сопротивление графита составляет около 50 мкОм · м, то есть по данному показателю он занимает промежуточное положение между проводниками и полупроводниками.

Из графита изготавливают контактные щетки для электродвигателей постоянного тока, а также электроды для мощных плавильных печей.

Графитовые порошки добавляют в полупроводящие пластмассы, выполняющие функции электромагнитных экранов в высоковольтных силовых кабелях.

14.8. Сверхпроводниковые материалы

Сверхпроводимость – явление резкого снижения удельного электрического сопротивления материала, практически до нуля, при достаточно низкой критической температуре θ_c и достаточно низкой критической индукции магнитного поля B_c . Для некоторых сложных сплавов обязательным условием также является высокое давление.

Бывают сверхпроводники I и II рода.

Сверхпроводники I рода переходят в сверхпроводящее состояние скачком (рис. 14.10, а). К ним относятся только чистые металлы. **Сверхпроводники II рода** имеют промежуточное состояние до перехода в состояние сверхпроводимости (рис. 14.10, б).

К сверхпроводникам относят многие металлы и более тысячи различных сплавов и соединений. Значения θ_c и B_c для некоторых из

них приведены в табл. 14.1. Сверхпроводимость не обнаружена у чистых серебра, меди, золота и платины.

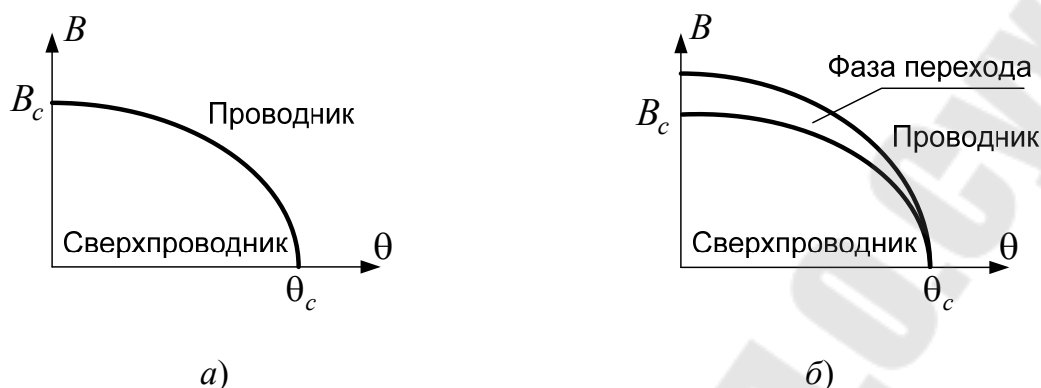


Рис. 14.10. Условия перехода в сверхпроводящее состояние:
 а – I рода; б – II рода

Таблица 14.1

**Параметры перехода в сверхпроводящее состояние
 для некоторых материалов**

Материал	Формула	θ_c , К	B_c , Тл
Алюминий	Al	1,2	0,01
Олово	Sn	3,7	0,03
Свинец	Pb	7,2	0,08
Ниобий	Nb	9,4	0,2
Станнид ниобия	Nb ₃ Sn	18,1	24,5

У металлов критические температуры перехода в сверхпроводящее состояние близки к абсолютному нулю температур. Это область так называемых «гелиевых» температур, сравнимых с точкой кипения гелия (4,2 К). Для сверхпроводящих сплавов характерными являются температуры жидкого водорода (около 30 К) и жидкого азота (около 70 К).

Сверхпроводники, имеющие температуру перехода выше 70 К, называют **высокотемпературными** (ВТСП).

Сверхпроводники являются идеальными диамагнетиками, то есть они полностью выталкиваются из внешнего магнитного поля. Это явление называют **эффектом Мейснера**. Существует известный опыт с «висящим магнитом», когда постоянный магнит висит в воздухе над ВТСП, погруженным в жидкий азот.

Основное преимущество практического применения сверхпроводниковых материалов – отсутствие в них потерь электроэнергии в их активном сопротивлении. Благодаря этому через сверхпроводники можно пропускать значительные токи, ограниченные только критической индукцией магнитного поля B_c . Главный недостаток таких материалов – необходимость наличия сложных охлаждающих установок, по которым должен циркулировать жидкий азот.

Рассмотрим области применения сверхпроводников в электротехнике.

Сверхпроводниковые электромагниты. Если через катушки из ВТСП материала, находящегося в сверхпроводящем состоянии, пропускать высокий ток, то вокруг этих катушек возникнет значительное магнитное поле. Такие электромагниты используют для поднятия грузов, в электропоездах на магнитной подушке и в мощных ускорителях частиц (коллайдерах).

Сверхпроводниковые линии электропередачи. На сегодняшний день в системах электроснабжения (особенно в США) используют кабельные сверхпроводниковые ЛЭП. Кабели в этих ЛЭП имеют полые жилы из ВТСП материала, а также полости между жилами и наружной изоляцией (рис. 14.11), в которых течет охлаждающая жидкость (азот). Плотность тока в таких линиях в несколько раз превышает плотность тока обычных линий того же сечения. Ограничение передаваемой энергии существует лишь по условию допустимого магнитного поля.

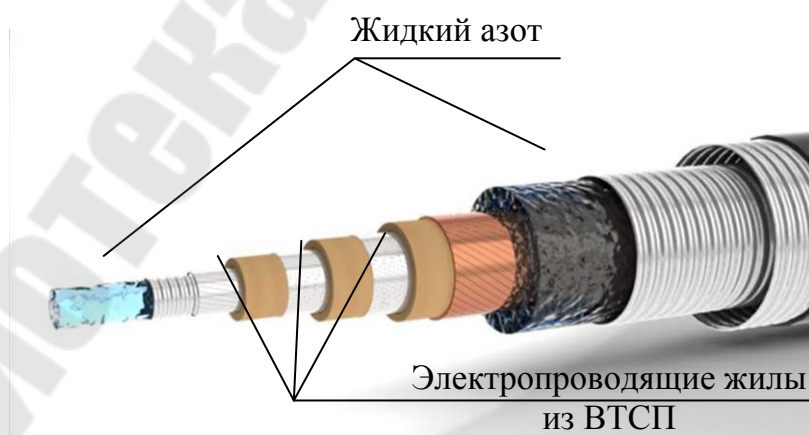


Рис. 14.11. Сверхпроводниковый высоковольтный кабель

Глава 15. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

15.1. Основные магнитные свойства материалов

Магнитные свойства материалов физика объясняет наличием в электронах атомов спинов, то есть вращением электронов вокруг собственной оси (рис. 15.1).

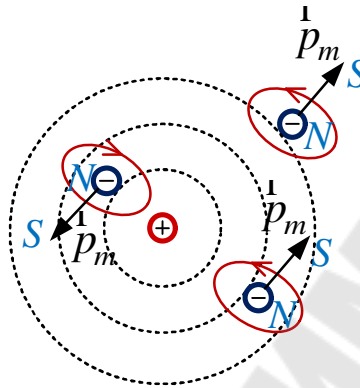


Рис. 15.1. Демонстрация спинов электронов и их магнитных моментов

Каждый вращающийся электрон обладает **магнитным моментом** \vec{p}_m , направленным от северного магнитного полюса N к южному магнитному полюсу S . Чем больше магнитных моментов направлено в одну сторону, тем выше внутреннее магнитное поле атома и, соответственно, всего материала. Общая намагниченность материала характеризуется **вектором намагниченности**:

$$\vec{J} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi}, \quad (15.1)$$

где V – объем образца материала; n – количество элементарных магнитных моментов \vec{p}_{mi} в объеме V .

Если $|\vec{J}| = 0$, то материал полностью размагничен.

Внутренняя магнитная индукция материала равна:

$$\vec{B}_{\text{внутр}} = \mu_0 \vec{J} = \mu_0 \chi \vec{H}_{\text{внеш}}, \quad (15.2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; χ – магнитная восприимчивость; $\vec{H}_{\text{внеш}}$ – напряженность внешнего магнитного поля.

Магнитная восприимчивость характеризует способность материала намагничиваться. Если $\chi = 0$, то материал никак не взаимодействует с магнитным полем.

Индукция внешнего магнитного поля, в свою очередь, определяется по формуле

$$\dot{B}_{\text{внеш}} = \mu_0 \dot{H}_{\text{внеш}}. \quad (15.3)$$

Тогда с учетом выражений (15.2) и (15.3) общая магнитная индукция материала будет равна:

$$\begin{aligned} \dot{B} &= \dot{B}_{\text{внеш}} + \dot{B}_{\text{внутр}} = \mu_0 \dot{H}_{\text{внеш}} + \mu_0 \chi \dot{H}_{\text{внеш}} = \\ &= \mu_0 (1 + \chi) \dot{H}_{\text{внеш}} = \mu_0 \mu \dot{H}_{\text{внеш}}, \end{aligned} \quad (15.4)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость материала.

Относительная магнитная проницаемость имеет тот же физический смысл, что и магнитная восприимчивость, только больше ее на единицу. На практике в расчетах величина μ удобнее, чем величина χ . Для вакуума $\chi = 0$ и $\mu = 1$.

Зависимости относительной магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H , частоты поля f и температуры θ приведены на рис. 15.2.

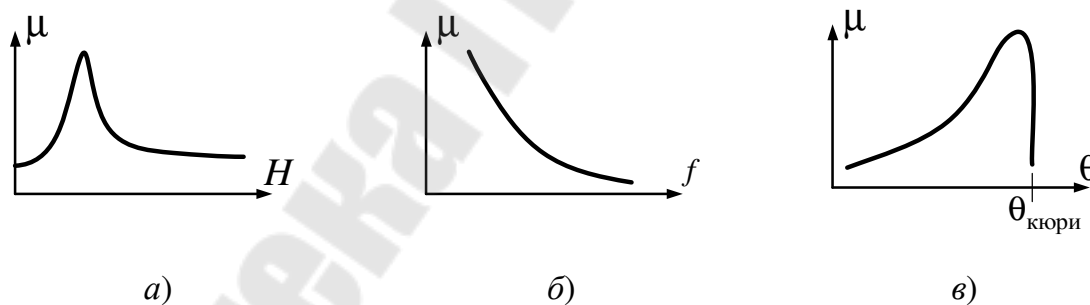


Рис. 15.2. Зависимости относительной магнитной проницаемости: *а* – от напряженности магнитного поля; *б* – от частоты; *в* – от температуры

При некоторой напряженности магнитного поля наблюдается максимум величины μ (рис. 15.2, *а*). С увеличением частоты поля величина μ убывает (рис. 15.2, *б*). С возрастанием температуры происходит рост величины μ до температуры $\theta_{\text{Кюри}}$, соответствующей точке Кюри (рис. 15.2, *в*), где материал теряет свои магнитные свойства.

15.2. Классификация магнетиков

Все материалы в природе в той или иной мере взаимодействуют с магнитным полем, то есть являются магнетиками. Однако у подавляющего большинства из них это взаимодействие очень слабое.

Все магнетики делятся на слабомагнитные и сильномагнитные. Слабомагнитные материалы, в свою очередь, бывают диамагнетики и парамагнетики. Сильномагнитные – это ферромагнетики.

Диамагнетики характеризуются тем, что слегка выталкиваются из магнитного поля (рис. 15.3, а).

У диамагнетиков: $\chi < 0$ и $\mu < 1$. Простые диамагнетики, к которым относятся медь, цинк, золото, ртуть и другие материалы, имеют значения $\chi \approx -10^{-6}$ и $\mu \approx 0,999999$. Это значит, что в слабом магнитном поле они практически прозрачны для магнитного поля.

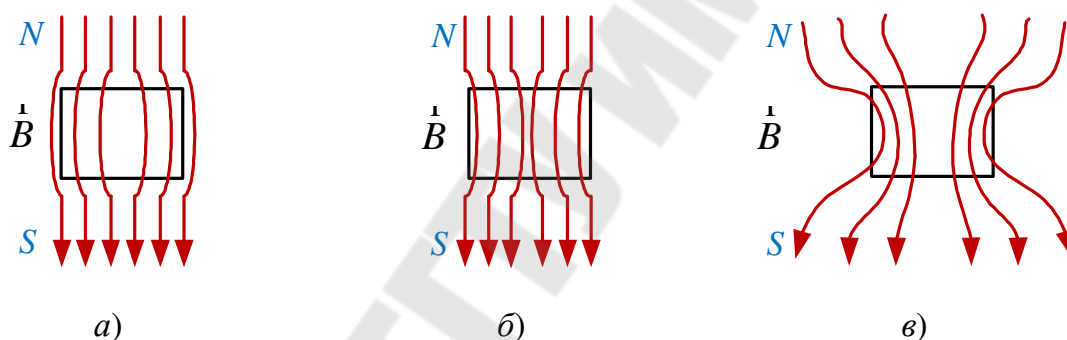


Рис. 15.3. Поведение материалов в магнитном поле:
а – диамагнетика; б – парамагнетика; в – ферромагнетика

Исключением среди диамагнетиков являются материалы, находящиеся в сверхпроводящем состоянии. У таких материалов $\mu \ll 0$, то есть они очень сильно выталкиваются из магнитного поля, и, по сути, относятся к сильномагнитным материалам.

Парамагнетики характеризуются тем, что слегка втягиваются в магнитное поле (рис. 15.3, б).

У парамагнетиков: $\chi > 0$ и $\mu > 1$. Парамагнетики, к которым относятся алюминий, платина, олово, вольфрам и другие материалы, имеют значения $\chi \approx 10^{-6}$ и $\mu \approx 1,000001$. Это значит, что в слабом магнитном поле они также почти прозрачны для этого поля. Однако существуют практические примеры такого взаимодействия. Так в индукционном счетчике электроэнергии алюминиевый диск вращается под действием магнитного поля.

Ферромагнетики очень сильно втягиваются в магнитное поле и при этом намагничиваются (рис. 15.3, в).

У ферромагнетиков $\chi \gg 0$ и $\mu \gg 1$. Значения этих величин находятся в диапазоне $10^2 - 10^5$ в зависимости от вида материала.

Только три известных металла обладают ферромагнитными свойствами при комнатных температурах: железо, никель и кобальт. Они обязательно входят в состав сложных сильномагнитных материалов.

Именно сильномагнитные материалы в электротехнике принято называть магнитными материалами.

15.3. Физические процессы в ферромагнетиках

Полностью размагниченный ферромагнетик состоит из отдельных намагниченных областей, которые называются **магнитными доменами** (рис. 15.4, а).

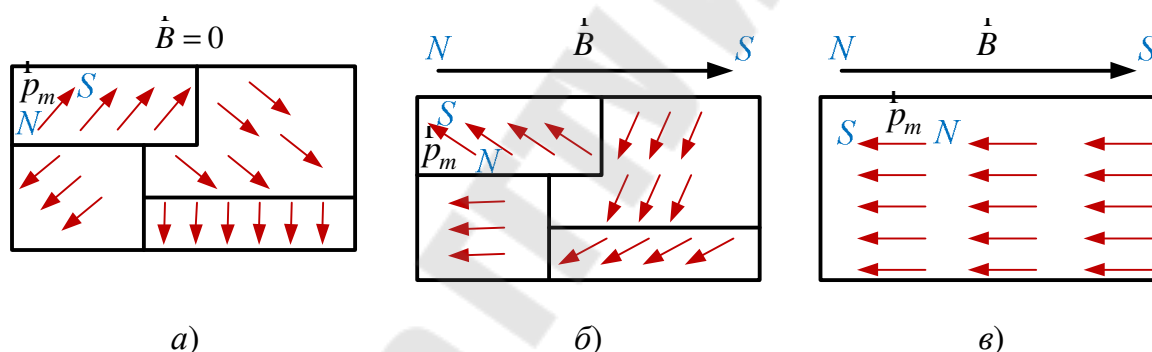


Рис. 15.4. Стадии намагничивания ферромагнетика:

а – нет намагничивания; б – намагничивание; в – магнитное насыщение

Магнитные домены сохраняются в ферромагнетике до некоторой максимальной температуры, которая называется **точкой Кюри**. При этом сумма векторов магнитных моментов атомов \vec{p}_m , то есть вектор намагниченности \vec{J} размагниченного ферромагнетика, стремится к нулю.

При включении внешнего магнитного поля начинается процесс намагничивания, который проявляется в том, что южные магнитные полюса магнитных моментов атомов материала притягиваются к северному магнитному полюсу внешнего поля, а их северные магнитные полюса – к южному (рис. 15.4, б).

Если напряженность внешнего поля увеличивать далее, то в результате все магнитные моменты ориентируются по направлению внешнего поля (рис. 15.4, в), и возникнет **магнитное насыщение** материала. В этом случае границы между магнитными доменами исчезают.

При снижении напряженности внешнего магнитного поля $H_{\text{внеш}}$ происходит запаздывание ориентации магнитных моментов за изменением поля. Это явление называется **магнитным гистерезисом** (рис. 15.5).

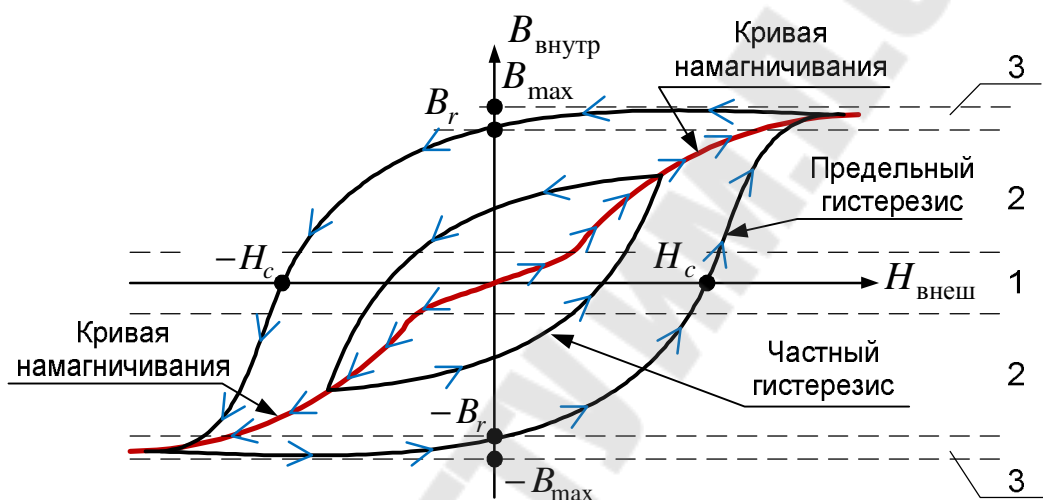


Рис. 15.5. Магнитный гистерезис:

- 1 – зона возврата магнитных доменов; 2 – зона основного гистерезиса;
3 – зона магнитного насыщения

Если материал размагничен, то движение вначале идет по центральному графику на рис. 15.5 в соответствии с указанными стрелками. При снижении значения $H_{\text{внеш}}$ движение далее осуществляется по гистерезисным петлям вдоль стрелок на рис. 15.5.

В процессе перемагничивания ферромагнетика переменным магнитным полем наблюдаются три основные зоны:

- 1) зона возврата магнитных доменов;
- 2) зона основного гистерезиса;
- 3) зона магнитного насыщения.

Первая зона имеет место при низких значениях напряженности внешнего магнитного поля. В этом случае магнитные моменты атомов быстро возвращаются к исходному состоянию и петли гистерезиса не возникает.

Вторая зона соответствует возникновению петель гистерезиса, размеры которых зависят от значения напряженности $H_{\text{внеш}}$. Если магнитного насыщения не происходит, то петли гистерезиса называются **частными гистерезисными циклами**. Если же возникает насыщение, то полученная петля называется **предельным гистерезисным циклом**.

По предельному гистерезисному циклу определяют ряд параметров ферромагнетиков (рис. 15.5):

- коэрцитивную (задерживающую) силу H_c ;
- остаточную индукцию материала B_r ;
- индукцию насыщения материала B_{max} .

Коэрцитивная сила – это напряженность внешнего магнитного поля, при которой предварительно намагниченный ферромагнетик полностью размагничивается.

Остаточная индукция материала – это внутренняя магнитная индукция материала при напряженности внешнего магнитного поля, равной нулю.

Индукция насыщения материала – это внутренняя магнитная индукция материала, при которой наступает его магнитное насыщение.

В зависимости от значений коэрцитивной силы H_c магнитные материалы условно делят на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы имеют высокие значения относительной магнитной проницаемости и невысокую коэрцитивную силу (не более 100 А/м). Их гистерезисный цикл достаточно узкий и высокий (рис. 15.6, а). Таким образом, эти материалы предназначены для легкого перемагничивания в переменном поле. Они применяются для изготовления сердечников катушек индуктивности и электромагнитов, а также магнитопроводов трансформаторов и электродвигателей.

Магнитотвердые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы (более 4000 А/м) и низкими значениями относительной магнитной проницаемости (рис. 15.6, б). Эти материалы, наоборот, крайне сложно перемагничиваются. Их используют для изготовления постоянных магнитов.

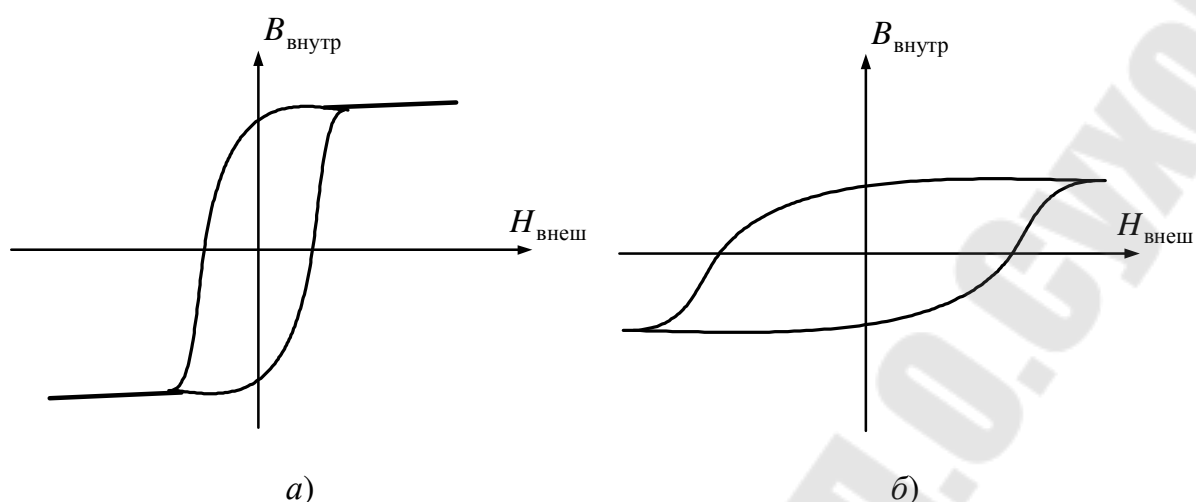


Рис. 15.6. Гистерезисные циклы:
a – магнитомягкий материал; *б* – магнитотвердый материал

В процессе перемагничивания ферромагнетика в нем наблюдаются потери электроэнергии двух видов:

- потери на гистерезис;
- потери на вихревые токи.

Потери на гистерезис пропорциональны площади петли гистерезиса и рассчитываются по формуле

$$P_H = \eta B_{\max}^n f V, \quad (15.5)$$

где η – коэффициент, зависящий от типа материала; B_{\max} – индукция насыщения материала; n – показатель степени, равный 1,6–2; f – частота поля; V – объем материала.

Потери на вихревые токи определяются по формуле

$$P_I = \varepsilon B_{\max}^2 f^2 V, \quad (15.6)$$

где ε – коэффициент, пропорциональный удельной электрической проводимости материала.

Чем выше удельное электрическое сопротивление магнитного материала, тем ниже в нем потери на вихревые токи.

15.4. Магнитомягкие материалы

Основной магнитомягкий материал, применяющийся в электротехнике – это **кремнистая электротехническая сталь**.

Введение (легирование) в сталь кремния повышает ее электрическое сопротивление, что приводит к снижению потерь на вихревые токи (табл. 15.1).

Концентрация кремния выше 4 % резко снижает механические характеристики стали.

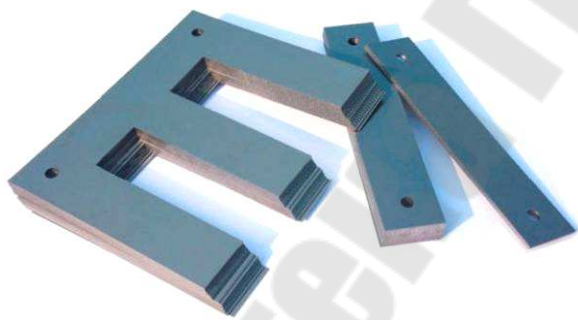
Относительная магнитная проницаемость кремнистых сталей может достигать значения $\mu = 2000$.

Таблица 15.1

Параметры кремнистых сталей

Группа стали	Процент Si	B_{\max} , Тл	ρ , мкОм · м,
Слабелегированная	0,8–1,8	2	0,25
Среднелегированная	1,8–2,8	2	0,4
Повышеннолегированная	2,8–3,8	1,96	0,5
Высоколегированная	3,8–4,8	1,9	0,6

Кремнистые стали выпускаются в виде лент, которые покрываются с обеих сторон изоляционным лаком и собираются затем в необходимую конструкцию для получения магнитного сердечника или магнитопровода (рис. 15.7, а). Лак между слоями стали препятствует протеканию вихревых токов, но не препятствует магнитному полю.



а)



б)

Рис. 15.7. Заготовки из кремнистой стали для магнитопровода (а) и лента из аморфного сплава (б)

В последние годы альтернативой кремнистым сталям являются **аморфные сплавы**. Их получают путем быстрого охлаждения расплава железа или кобальта с другими материалами, такими как кремний, бор, углерод, фосфор. В результате образуется материал с сильно деформированной кристаллической решеткой, но с хорошими маг-

нитными характеристиками (рис. 15.7, б). Так, коэрцитивная сила аморфного сплава на основе железа может быть в 15 раз ниже, чем у кремнистой стали, а его удельное сопротивление в 3 раза выше. Это существенно снижает потери электроэнергии при перемагничивании такого материала. В Российской Федерации уже налажено производство силовых трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов.

Для низковольтной электротехнической и электронной аппаратуры применяют пермаллои и ферриты.

Пермаллой – это сплав на основе железа и никеля (рис. 15.8, а). Он характеризуется очень высокими значениями относительной магнитной проницаемости (до 100 000) при низких напряженностях магнитного поля. Коэрцитивная сила у пермаллоев практически такая же, как у кремнистых сталей, а индукция насыщения несколько ниже.



а)



б)

Рис. 15.8. Кольца из пермаллоя (а) и изделия из ферритов (б)

Пермаллои служат для изготовления сердечников малогабаритных реле и катушек индуктивности.

Ферриты – это керамические магнитные материалы на основе оксидов железа и оксидов других металлов (рис. 15.8, б), таких как никель, марганец, цинк, кадмий.

Ферриты имеют удельное сопротивление практически как у диэлектриков и значительно не снижают своих магнитных свойств при увеличении частоты. По относительной магнитной проницаемости они близки к пермаллоям, но значительно уступают им по индукции насыщения.

Основная область применения ферритов – высокочастотные (импульсные) трансформаторы и катушки индуктивности для задач электроники, в том числе и силовой.

15.5. Магнитотвердые материалы

Постоянный магнит – это элемент электротехники, способный длительно удерживать свою остаточную намагниченность.

Постоянные магниты изготавливают следующим образом. Вначале магнитотвердому материалу придают требуемую форму, а затем помещают полученный образец в установку, создающую высокую напряженность постоянного магнитного поля и намагничивающую этот образец.

Не подвергаемые внешнему воздействию постоянные магниты могут сохранять свою остаточную намагниченность десятки лет. Однако если от магнита отбирать энергию, например, прикрепив к нему стальной груз, то будет наблюдаться постепенное снижение его остаточной намагниченности.

Полезная энергия возникает в зазоре между магнитами (рис. 15.9, а). Ее значение определяется положением рабочей точки на части петли гистерезиса, которая называется **кривой размагничивания** (рис. 15.9, б).

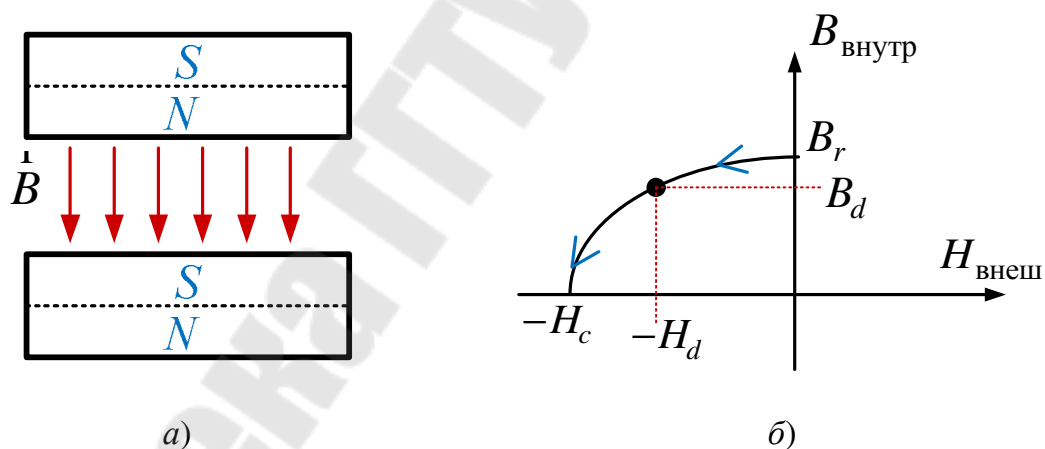


Рис. 15.9. Поле между постоянными магнитами (а) и кривая размагничивания (б)

Значение удельной энергии W_d между магнитами определяется по формуле

$$W_d = \frac{|B_d H_d|}{2}, \text{ Дж/м}^3, \quad (15.7)$$

где B_d и H_d – магнитная индукция и напряженность поля, соответствующие положению рабочей точки на кривой размагничивания.

Чем больше расстояние между магнитами, тем выше H_d и ниже B_d и наоборот. Таким образом, существует оптимальное положение рабочей точки на кривой размагничивания. Тогда $W_d = W_{\max}$. Величина W_{\max} является одной из основных характеристик постоянных магнитов.

При отборе полезной энергии на внешние электрические цепи кривая размагничивания постепенно опускается вниз и значение энергии W_d снижается.

Основная область применения постоянных магнитов для задач энергетики – это небольшие электрогенераторы и электродвигатели постоянного тока. В этих устройствах магниты создают необходимую напряженность магнитного поля в соответствии с требованиями закона электромагнитной индукции. Однако энергия, отбираемая от магнитов во внешние цепи, незначительна, и постоянные магниты работают длительное время, не утрачивая своих свойств.

Для изготовления постоянных магнитов на сегодняшний день применяют три основных технологии:

- литые сплавы;
- металлокерамические магниты;
- полимерные постоянные магниты.

Литые сплавы для постоянных магнитов выполняются на основе системы «алюминий – никель – железо». Такие материалы называются **альни**.

Сплав альни с кобальтом называется **альнико**. Этот сплав существенно превосходит альни по магнитной энергии (табл. 15.2).

В последние годы значительное распространение получили **неодимовые магниты** (рис. 15.10, *а*) на основе сплава $Nd_2Fe_{14}B$. В их состав входит редкоземельный элемент – неодим Nd.



Рис. 15.10. Неодимовый магнит (*а*) и магнитотвердые ферриты (*б*)

Неодимовые магниты характеризуются очень высокими значениями магнитной энергии (табл. 15.2).

Металлокерамические магниты получают путем прессования и спекания порошков различных металлов. На сегодняшний день наилучшими характеристиками среди таких магнитов обладают **самариевые магниты**, представляющие собой, как правило, сплав редкоземельного элемента самария и кобальта SmCo_5 . Эти магниты обладают высокими значениями магнитной энергии (табл. 15.2) и способны работать при температурах до 350 °С.

Таблица 15.2

Ориентировочные значения энергии постоянных магнитов

Тип магнита	Альни	Альнико	Неодимовый	Самариевый	Феррит
W_{max} , кДж/м ³	5	40	350	200	10

К металлокерамическим магнитам относятся **магнитотвердые ферриты** – особый вид ферритов с гексагональной кристаллической решеткой. Их получают путем спекания оксидов железа с оксидами других металлов. Наибольшее распространение получили ферриты на основе бария с формулой $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. Эти материалы удобны для получения магнитов сложных форм (рис. 15.10, б). По магнитным свойствам они значительно уступают современным видам магнитов (табл. 15.2), однако имеют низкую стоимость.

Полимерные постоянные магниты (магнитопласты) изготавливаются из смеси металлического магнитного порошка и связующего полимера (винила или резины). Такая технология позволяет изготавливать магниты сложной конструкции и гибкие магнитные листы.

Литература

1. Дробов, А. В. Электротехнические материалы : учеб. пособие / А. В. Дробов, Н. Ю. Ершова. – Минск : РИПО, 2019. – 237 с. : ил.
2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения : учеб. пособие / Е. Е. Привалов. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 266 с. : ил.
3. Целебровский, Ю. В. Электротехническое и конструкционное материаловедение : учеб. пособие / Ю. В. Целебровский ; Новосибирск : Новосиб. гос. техн. ун-т, 2019. – 64 с. : ил.
4. Конструкционные электротехнические материалы : учеб. пособие / В. П. Горелов [и др.] ; под ред. В. П. Горелова. – 5-е изд., стер. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 341 с. : ил.
5. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – 7-е изд. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
6. Привалов, Е. Е. Электротехническое материаловедение : учеб. пособие / Е. Е. Привалов. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. – 234 с. : ил.
7. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – М. : Изд-во Оникс, 2008. – 1056 с.

Учебное издание

Селиверстов Георгий Иванович
Зализный Дмитрий Иванович
Гончаренко Юлия Вячеславовна

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Н. Г. Мансурова*
Компьютерная верстка *И. П. Минина*

Подписано в печать 24.09.24.

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

Ризография. Усл. печ. л. 6,28. Уч.-изд. л. 6,97.

Тираж 70 экз. Заказ № 583/15.

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель