

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Саратовский государственный аграрный университет
имени Н.И. Вавилова»

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Краткий курс лекций

для бакалавров

Направление подготовки
35.03.06 Агроинженерия

Профиль подготовки
«Электрооборудование и электротехнологии»

Саратов 2015

УДК 631.537
ББК 40.7я 73
С72

С72 Электротехнические материалы: краткий курс лекций для бакалавров направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» / Сост.: А.А. Спиридонов, С.В. Шлюпиков / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» – Саратов, 2015. – 49 с.

ISBN...

Краткий курс лекций по дисциплине «Электротехнические материалы» составлен в соответствии с рабочей программой дисциплины и предназначен для студентов по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия». Краткий курс лекций включает теоретическую часть об электротехнических материалах, которые обладают особыми свойствами по отношению к электрическим, магнитным и электромагнитным полям, а также рассматриваются вопросы, правильного выбора и применения этих материалов в условиях эксплуатации электрооборудования. Студенты также изучают основные характеристики этих материалов и область их применения. Краткий курс лекций направлен на формирование у студентов знаний по выбору и применению электротехнических материалов в условиях эксплуатации электрооборудования.

УДК 631.537
ББК 40.7я 73

© Спиридонов А.А., 2015
© ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2015

Введение

«Электротехнические материалы» – одно из основных направлений эксплуатационной подготовки бакалавров. Эту дисциплину студенты изучают на лекционных, лабораторных и практических занятиях. Полученные знания и навыки затем студенты используют при подготовке квалификационной работы и в практической деятельности на производстве.

В настоящее время в сельскохозяйственном производстве эксплуатируется достаточно большое количество электрооборудования. Каждое электрооборудование в конструкции содержит электротехнические материалы. Они обладают особыми свойствами по отношению к электрическому току и магнитному полю. К ним относятся проводниковые, магнитные и электроизоляционные материалы. Кроме того, в электротехнических установках при монтаже и ремонте широко применяются различные вспомогательные материалы, многие из которых также относятся к электротехническим материалам.

В любых электрических аппаратах широко применяются диэлектрики (электроизоляционные материалы). Они должны обладать большим электрическим сопротивлением, т.к. с помощью них изолируют токоведущие части друг от друга и от заземленных частей электрооборудования. Поэтому наличие их является необходимым условием функционирования любого электрического аппарата. Но диэлектрические свойства электроизоляционных материалов изменяются в широких пределах и определяют в целом надежность работы электрооборудования.

Материалы, из которых изготовлены токоведущие части машин, должны хорошо проводить электрический ток, т.е. обладать малым электрическим сопротивлением. Эту группу составляют проводниковые материалы. Правильный выбор этих материалов в условиях эксплуатации и ремонта электрооборудования является важной задачей для любого специалиста.

Магнитные материалы применяются в энергетике в трансформаторах, электрических машинах и электромагнитах. В условиях эксплуатации со временем магнитные свойства этих материалов снижаются, что является причиной ухудшения энергетических показателей электрических аппаратов.

Основная методическая направленность краткого курса лекций – научить будущих специалистов поддерживать высокую надежность электрооборудования за счет правильного выбора и использования электротехнических материалов в условиях сельского хозяйства.

Лекция 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Классификация электротехнических материалов

Под электрическими материалами понимают материалы, которые обладают особыми свойствами по отношению к электрическим, магнитным и электромагнитным полям.

Они разделяются на четыре группы:

I. Материалы, служащие для проведения электрического тока—проводниковые материалы;

II. Материалы изолирующие (*диэлектрики*), ограничивающие пути тока;

III. Материалы, запасающие или проводящие магнитный поток—*магнитные материалы*;

IV. *Полупроводники*.

Любое оборудование и аппараты (электродвигатели; трансформаторы и т.д.) выполнены из электротехнических материалов, обладающих особыми свойствами, отличными от свойств обычных конструкционных материалов.

Материалы, из которых изготовлены токоведущие части машин, должны хорошо проводить электрический ток, т.е. обладать малым электрическим сопротивлением. Эту группу составляют проводниковые материалы. Наиболее значительную группу составляют материалы для изготовления проводов (проводниковые материалы высокой проводимости). Особую группу образуют материалы, используемые для изготовления реостатов и резисторов, которые называются проводниковыми материалами высокого электрического сопротивления. Остальные проводниковые материалы относятся к группе специальных материалов, которые носят название в соответствии с применением: материалы для контактов, для биметаллических пластин, для плавких предохранителей и т.п.

Как специальный материал относится к проводникам графит, который используется для разных целей.

В любых электрических аппаратах применяются диэлектрики (электроизоляционные материалы). Они, наоборот, должны обладать большим электрическим сопротивлением, т.к. с помощью них изолируют токоведущие части друг от друга и от заземленных частей электрооборудования. Поэтому наличие их является необходимым условием функционирования любого электрического аппарата.

Диэлектрики широко используются для изолирования проводов и кабелей, а также для изоляции друг от друга проводников, находящихся под различными потенциалами, например, изоляторы воздушных линий электропередач. Эффективность использования электрических установок и их надежность целиком определяются качеством использованных электроизоляционных материалов.

Магнитные материалы используются в энергетике в качестве разнообразных магнитопроводов в трансформаторах, электрических машинах, электромагнитах и т.д. Для уменьшения вихревых токов магнитопроводы собирают из отдельных пластин.

Наиболее широко используемых магнитных материалов является низкоуглеродистая электротехническая сталь. Она выпускается в виде листов толщиной от 0,2 мм до 4 мм и содержит не выше 0,04 % углерода и кремния от 0,7 до 4,8 %.

По способу прокатки электротехнические листовые стали делятся на обычные (горячекатаные) и на текстурованные (холоднокатаные).

Полупроводниками являются вещества, занимающие по величине удельной проводимости промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Эти вещества обладают как свойствами проводника, так и диэлектрика. Вместе с тем они обладают рядом специфических свойств, резко отличающих их от проводников и диэлектриков, основным из которых являются сильная зависимость удельной проводимости от воздействия внешних факторов (температуры, света, электрического поля и др.). К полупроводникам относятся элементы четвертой группы периодической системы Менделеева, а так же химические соединения третьей и пятой группы.

Ведущее место среди полупроводниковых материалов, используемых в полупроводниковой электронике, занимают кремний, германий и арсенид галлия.

Электрофизические свойства полупроводников в настоящем методическом указании не рассматриваются, т.к. они подробно изучаются по дисциплине «Электроника».

1.2 Классификация электроизоляционных материалов (диэлектриков)

Назначение электроизоляционных материалов в электрооборудовании и заключаются в создании между частями, имеющими разные электрические потенциалы, такой среды, которая препятствовала бы прохождению тока между этими частями. Поэтому наличие их является необходимым условием функционирования каждого электротехнического устройства.

Особенно велико значение электроизоляционных материалов в силовом электрооборудовании, где от их качества в решающей степени зависят срок службы и надежность большинства видов оборудования. Эффективность использования электрических установок целиком определяется качеством использования электроизоляционных материалов.

Электроизоляционные материалы широко используются для изолирования проводов и кабелей, в электроизоляционных системах электрических машин и трансформаторов, для изготовления изоляторов и различных деталей в слаботочной электронике.

Для оценки качества электроизоляционных материалов и их применимости для определенных практических целей необходимы сведения об их характеристиках, количественно определяющих электрические свойства (электропроводность, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, электрическую прочность) и общифизико-химические свойства (механическую прочность, нагревостойкость, химическую стойкость и т.д.)

Для того, чтобы облегчить изучение разнообразных электроизоляционных материалов, необходимо их классифицировать, т.е. разбить их на группы со сходными свойствами. Ниже приведена классификация диэлектриков, наиболее часто встречающихся в учебной литературе.

I. По назначению

- *Пассивные* (изолирующие);
- *Активные*.

Пассивные или изолирующие электроизоляционные материалы служат для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и разделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Назначение этой изоляции – не допускать прохождения электрического тока по каким-либо нежелательным путям, помимо тех путей, которые предусмотрены электрической схемой. Кроме того, пассивные диэлектрики не изменяют характеристики электрической цепи. Сюда относятся главная и продольная изоляция электрических машин и трансформаторов, изоляция проводов и кабелей и т.д.

Активные диэлектрики – диэлектрики, которые преобразуют один вид энергии в другой. К ним можно отнести такие как сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и др.

Пьезоэлектрический эффект состоит в непосредственном преобразовании механической энергии в электрическую или наоборот. Так, например, под действием механических напряжений на диэлектрик на его поверхности появляются электрические заряды, величина которых линейно зависит от механического напряжения и на противоположных плоскостях возникает разность потенциалов. Замкнув электроды, нанесенные на противоположные поверхности этого диэлектрика, можно получить ток и таким образом преобразовать механическую работу в электрическую энергию.

II. По способу получения

- *Природные* (сланца, мрамор, дерево и т.д.);
- *Искусственные* (слоистые пластинки, хлопчатобумажная, шелковая и капроновая ткани и пряжа, текстолит, гетинакс, резиновая и эмалевая изоляция и т.д.).

III. По агрегатному состоянию

- *Твердые*;
- *Жидкие*;
- *Газообразные*.

К *твердым* диэлектрикам относятся: бумага, картон, пряжа, резина, электроизоляционные пленки, стекла и т.д.

К *жидким* диэлектрикам можно отнести нефтяные электроизоляционные масла и синтетические жидкости (например, савол). Область их применения – масляные трансформаторы и выключатели, конденсаторы, силовые кабели и т.д.

Газообразные диэлектрики, особенно воздух, играет весьма важную роль в системе электрической изоляции. Например, провода линий высокого и низкого напряжений на всем протяжении между мачтами изолированы один от другого слоем воздуха.

IV. По химическому составу

- *Органические;*
- *Не органические.*

Электроизоляционные материалы *органического* происхождения содержат в своих молекулах углерод, например, бумага, картон, текстолитовые материалы, натуральный шелк и др. Многие органические электроизоляционные материалы обладают ценными механическими свойствами: гибкостью и эластичностью. Из них могут быть изготовлены волокна, пленки и изделия других разнообразных форм. Поэтому они нашли весьма широкое применение. Однако органические электроизоляционные материалы имеют относительно низкую нагревостойкость.

Неорганические материалы в основном содержат кремний. К этим материалам относятся: слюда, электротехническое стекло, асбест, стеклянное волокно и др.

Неорганические электроизоляционные материалы в большинстве случаев не обладают гибкостью и эластичностью, часто они хрупкие. Технология их обработки сравнительно сложна. Однако, как правило, они обладают более высокой нагревостойкостью. Поэтому они применяются в тех случаях, когда требуется обеспечить высокую рабочую температуру изоляции.

V. По строению молекул

- *Нейтральные;*
- *Полярные;*
- *Ионные.*

Нейтральные молекулы обладают симметричным строением, т.к. у них совпадают центры положительных и отрицательных зарядов, и отсутствует дипольный момент. Вещества нейтрального строения являются хорошими диэлектриками в любом агрегатном состоянии. Материалы, имеющие нейтральное строение молекул, не смачиваются водой, например, парафин.

Если же в молекулах центры противоположных по знаку зарядов не совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга, то такие молекулы называются *полярными* или *дипольными*. Материалы с полярным соединением молекул притягивают молекулы воды, смачиваются водой и другими полярными жидкостями.

VI. По температурному воздействию

- *Термопластичные;*
- *Терморезистивные.*

Термопластичные материалы при нагревании могут размягчаться, а при остывании – затвердевают. Они допускают неоднократную термообработку без существенных изменений своих свойств, например, различные смолы.

Терморезистивные – которые при нагреве вначале переходят в вязко – текучее состояние, но затем затвердевают и далее процесс не обратим. К *терморезистивным* материалам относятся различные лаки.

Вопросы для самоконтроля

1. Особые свойства электротехнических материалов.
2. Классификация электротехнических материалов.
3. Назначение диэлектриков в электрических аппаратах.
4. Назначение магнитных материалов в электрических аппаратах.
5. Область применения проводниковых материалов.

6. Классификация электроизоляционных материалов.
7. Пассивные и активные диэлектрики.
8. Диэлектрики по агрегатному состоянию.
9. Термопластичные и терморезистивные диэлектрики
10. Диэлектрики по химическому составу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимофеев, И.А.* Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. *Серебряков, А.С.* Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. *Бородулин, В.Н.* Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.
4. *Герасимов, В.Г.* Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.
5. *Шустов, М.А.* Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов /М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.

Лекция 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

1.1. Поляризация диэлектриков

Основным, наиболее характерным процессом, протекающим в любом диэлектрике под воздействием электрического поля, является *поляризация*.

Поляризацией называется процесс смещения связанных электрических зарядов в диэлектрике под действием электрического поля.

Процесс поляризации можно пояснить, представив диэлектрик в виде пластин (рис. 2.1, а), помещенный между двумя металлическими электродами 2, образующими конденсатор.

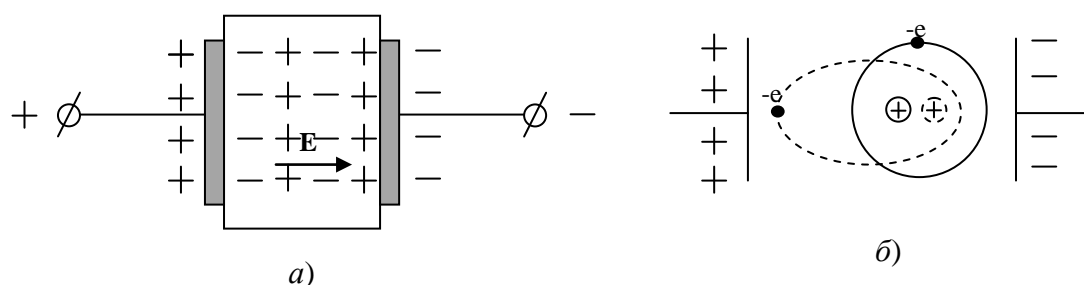


Рисунок 2.1—Пояснение к процессу поляризации диэлектриков

Если конденсатор подключить к источнику постоянного напряжения, то на его электродах появятся электрические заряды с противоположными знаками. Эти заряды создают в диэлектрике электрическое поле E . Под действием сил этого поля электроны атомов сместятся относительно своих ядер в сторону положительного электрода – анода, а положительные заряды (ядра атомов) – в сторону отрицательного электрода. Таким образом, на поверхности диэлектрика появятся заряды противоположного знака, т.е. образец диэлектрика, помещенный в электрическое поле, приобретает полярность: одна его поверхность, прилегающая к положительному электроду, заряжается отрицательно, другая поверхность, прилегающая к отрицательному электроду – положительно (рис. 2.1, б). Отсюда и термин “*поляризация*”. При поляризации по цепи протекает электрический ток.

По природе электрических зарядов и структуре молекул различают *электронную*, *ионную* и *дипольные* поляризации.

Электронная поляризация протекает мгновенно, порядка 10-15 сек и сопровождается без потерь энергии. Смещение электронов является упругим, исчезающим после снятия напряжения.

Электронная поляризация от температуры не зависит, если плотность вещества сохраняется постоянной.

Электронная поляризация наблюдается для всех видов диэлектриков.

Ионная поляризация состоит в упругом смещении связанных ионов из положения их равновесия на очень малые расстояния, меньшее, чем расстояние между соседними ионами. Ионная поляризация имеет место только у диэлектриков, представляющих собой ионные кристаллы. Эта значительная более сильная поляризация, чем электронная. Поскольку размеры и инерция ионов больше, чем у электронов, поэтому поляризация происходит медленнее, но все же достаточно быстро (10^{-12} – 10^{-13} сек).

При повышении температуры расстояние между ионами в решетке возрастают, поэтому поляризация ионов увеличивается.

Ионная поляризация, как и электронная, не связана с потерями энергии. К диэлектрикам с ионной поляризацией относятся слюда, некоторые виды керамики и др.

Дипольная поляризация – это поворот дипольных молекул под действием электронного поля. В природе имеются диэлектрики, молекулы которых состоят из положительных и отрицательных ионов и находящиеся на определенном расстоянии друг от друга. Дипольная поляризация свойственна, главным образом газам и жидкостям, но наблюдается, так же в твердых органических диэлектриках, например, в материалах на основе целлюлозы.

Дипольная поляризация происходит относительно медленно (в увлажненных диэлектриках процесс поляризации достигает до 60 сек) и сопровождается потерями энергии затрачиваемой на преодоление внутреннего трения в материале при повороте диполей, т.е. дипольная поляризация протекает с нагревом диэлектрика.

С увеличением температуры величина дипольной поляризации сначала возрастает (за счет ослабления молекулярных сил), затем, когда хаотическое движение, увеличиваемое продолжающимся ростом температуры, становится интенсивнее, величина дипольной поляризации начинает падать.

1.2 Диэлектрическая проницаемость

Явление поляризации диэлектрика представляет интерес для инженера потому, что оно обуславливает величину емкости. Любую электрическую цепь, изолированную друг от друга каким-нибудь диэлектриком, можно представить себе как конденсатор, имеющий определенную емкость (емкость между витками обмотки в электрической машине, емкость между кожухом трансформатора и его обмоткой и т.д.).

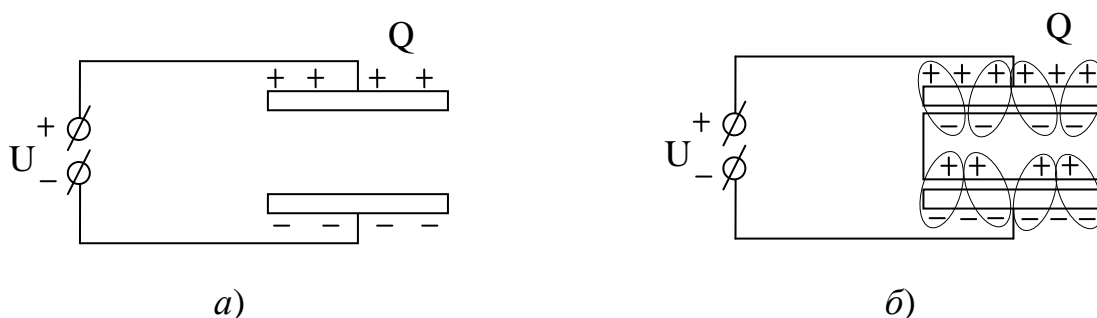


Рисунок 2.2– Пояснение к процессу диэлектрическая проницаемость где *а*– вакуумный конденсатор; *б*– конденсатор с диэлектриком

При подключении напряжения к его обкладкам на них образуются определенный заряд Q , зависящий как от напряжения U и от размеров конденсатора (от зазора и площади обкладок). Емкость конденсатора будет равна:

$$C_0 = \frac{Q}{U} \quad (2.1)$$

Не меняя обкладок и расстояния между ними, введем между обкладками диэлектрик. В диэлектрике произойдет поляризация и у поверхности обкладок выступят заряды противоположного знака, которые свяжут (нейтрализуют) часть заряда на обкладках. За счет этого, при неизменном напряжении U , на обкладках можно добавить некоторый заряд ΔQ , причем емкость конденсатора увеличивается и будет равна:

$$C_q = \frac{Q + \Delta Q}{U} > C_0 \quad (2.2)$$

Следовательно, степень поляризации диэлектрика оценивается увеличением емкости конденсатора, если между пластинами конденсатора вместо вакуума поместить диэлектрик.

Отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости того же конденсатора, когда диэлектриком является вакуум, называется относительной диэлектрической проницаемостью и обозначаются буквой ϵ .

$$\varepsilon = \frac{C_q}{C_0} \quad (2.1)$$

Таким образом, чем больше поляризация диэлектрика, тем больше будет емкость конденсатора, тем будет больше ε . Следовательно, диэлектрическая проницаемость – это количественная мера процесса поляризации. Поэтому для конденсаторного производства выгодно подбирать диэлектрики с высоким значением ε . Наоборот, для изоляции высоковольтных кабелей, нужна малая емкость, тогда выбирается диэлектрик с малой ε . Наименьшей величиной ε обладают газы, у которых $\varepsilon \approx 1,0$; так, для сухого воздуха при нормальном давлении и температуре $\varepsilon = 1,0006$. Неполлярные твердые диэлектрики имеют $\varepsilon=1,9\dots2,3$, а полярные – от 3 до нескольких десятков.

1.3 Влияние агрегатного состояния и температуры на диэлектрическую проницаемость

Диэлектрическая проницаемость зависит от температуры у всех диэлектрических материалов. На рис. 2.3 показаны типичные кривые температурной зависимости при электронной (ε_e), ионной (ε_u) и дипольной (ε_d) поляризациях для твердого, жидкого и газообразного состояний.

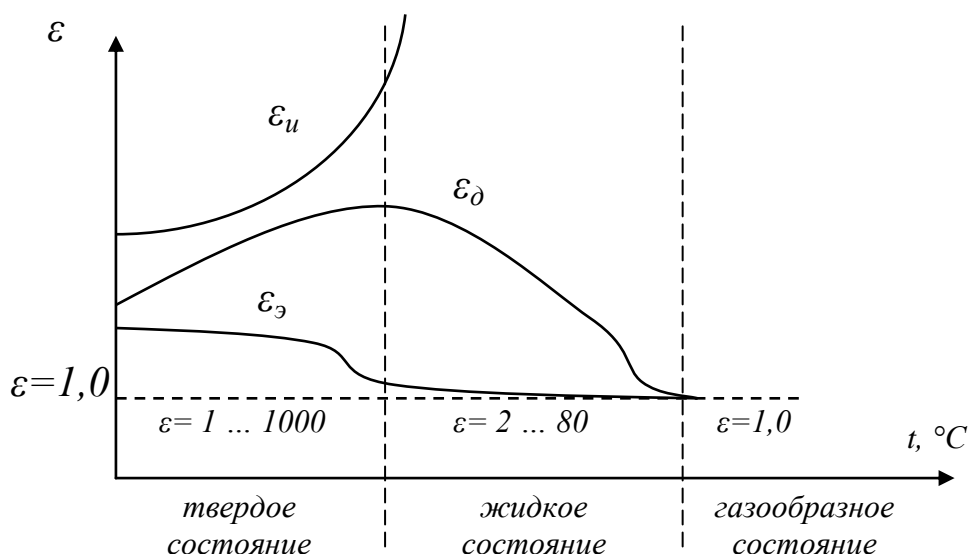


Рисунок 2.3– Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и агрегатного состояния диэлектрика

Как было отмечено выше, поляризуемость диэлектрика при электронной поляризации не зависит от температуры. Однако величина ε_e уменьшается с повышением температуры, что можно объяснить тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема. Кривая, показывающая зависимость ε_e от температуры подобно кривой изменения плотности вещества из твердого состояния в жидкое и из жидкого в газообразное.

С повышением температуры величина ионной поляризации, а следовательно и ε_u возрастает, поскольку тепловое расширение, удаляя ионы друг от друга, ослабляет действующие между ними упругие силы.

Для диэлектриков с ионным строением имеет смысл рассматривать температурную зависимость ε_u только в пределах твердого состояния, т.к. при расплавлении, ионные соединения становятся проводниками второго рода.

В области низких температур вязкость вещества велика и поэтому дипольные молекулы неподвижны; при нагреве материал размягчается (вязкость материала падает) и диполи начинают поворачиваться, обуславливая рост ε_d . В области высоких температур, выше температуры плавления, правильной ориентации диполей мешает усилившееся тепловое движение и ε_d начинает снижаться с ростом температуры.

Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости диэлектриков является, как правило, нежелательным явлением, хотя она в большинстве случаев и не угрожает работоспособности оборудования.

Относительная диэлектрическая проницаемость всех диэлектриков сильно зависит от частоты переменного поля. Относительная диэлектрическая проницаемость уменьшается от более высокого значения до очень низкого значения.

Высокое значение относительной диэлектрической проницаемости при низких частотах объясняется тем, что в этой области частот полностью реализуются все виды поляризации. С ростом частоты доля дипольных поляризации медленно убывает и в области высоких частот диэлектрическая проницаемость определяется только электронной и ионной поляризациями.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется поляризацией диэлектриков.
2. Причины увеличения емкости конденсатора с диэлектриком.
3. Виды поляризации диэлектриков.
4. Сущность электронной поляризации.
5. Сущность ионной поляризации.
6. Понятие относительной диэлектрической проницаемости.
7. Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев, И.А. Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.
4. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.
5. Шустов, М.А. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов /М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.

Лекция 3

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

1.1 Электропроводность в твердых диэлектриках

Проводимость диэлектриков резко отличается от проводимости металлических проводников. Металлы имеют электронную проводимость, обусловленную наличием в металле весьма большого числа свободных электронов. Как было отмечено выше, под воздействием электрического поля в диэлектрике происходит поляризация. Однако смещение электрических зарядов в диэлектриках при поляризации следует отличать от движения свободных зарядов в проводниках. Свободные заряды в проводниках могут передвигаться сравнительно на большие расстояния и в течение всего времени действия электрического поля. Для рассмотрения механизма электропроводности на рис. 3.1 приведена эквивалентная схема диэлектрика.

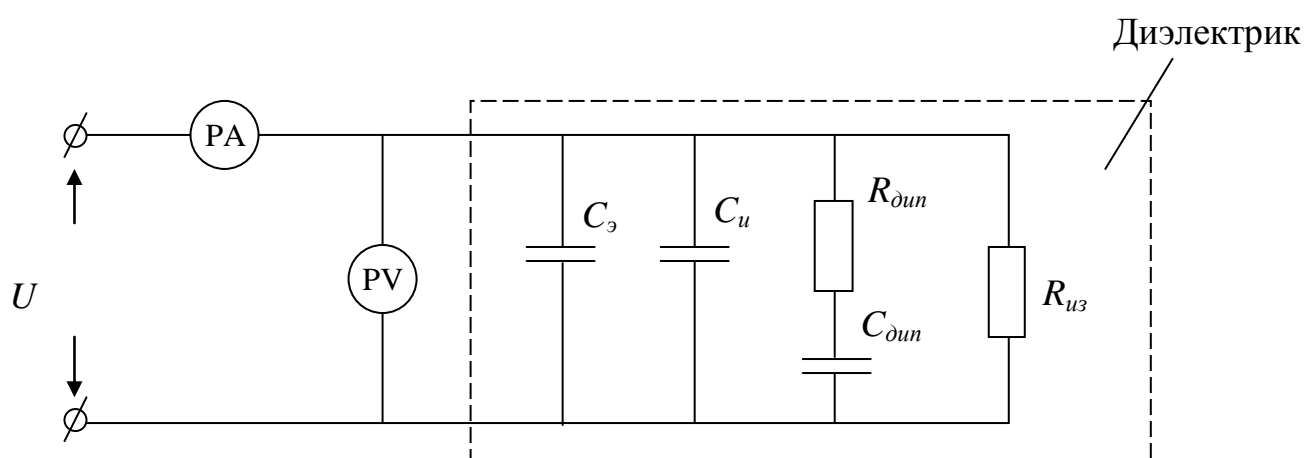


Рисунок 3.1– Эквивалентная схема диэлектрика

Измерительные приборы на рис. 3.1 служат для измерения подводимого напряжения к диэлектрику и тока, протекающего через диэлектрик. В схеме $C_э$, $C_и$ и $C_{дин}$ – эквивалентные конденсаторы, емкость которых создается электронной, ионной и дипольной поляризации. $R_{дин}$ – означает, что поляризация происходит с потерями электрической энергии, поэтому для учета этого явления последовательно с конденсатором $C_{дин}$ включено сопротивление $R_{дин}$.

В реальном диэлектрике под воздействием напряжения всегда имеются два вида токов: 1 – ток сквозной проводимости (ток утечки i_{ym}), величина которого зависит от величины приложенного напряжения и сопротивления изоляции $R_{из}$ и обусловлен движением свободных зарядов; 2 – емкостный ток, зависящий от напряжения и поляризации диэлектрика. Емкостный ток, в свою очередь складывается: 1 – из тока смещения ($i_{см}$), обусловленного смещением зарядов при электронной и ионной поляризациях; 2 – тока абсорбция ($i_{аб}$), образованного замедленной дипольной поляризацией.

Общий ток в цепи с диэлектриком равен

$$i = i_{см} + i_{аб} + i_{ym} \quad (3.1)$$

Токи смещения $i_{см}$ при электронной и ионной поляризациях столь кратковременны, что их не удастся зафиксировать прибором.

С учетом этого общий ток равен

$$i = i_{аб} + i_{ym} \quad (3.2)$$

В момент включения диэлектрика в электрическую цепь величина суммарного тока i значительно больше, чем величина тока сквозной проводимости i_{ym} . Это объясняется тем, что в цепи протекают токи $i_{см}$ и $i_{аб}$, связанные с явлением поляризации.

После того, когда процессы поляризации завершаются, через диэлектрик протекает только ток сквозной проводимости i_{ym} . Поэтому проводимость диэлектрика должна оцениваться током i_{ym} , который устанавливается по истечении некоторого времени после приложения к диэлектрику напряжения.

Поляризационные токи необходимо принимать во внимание при измерениях проводимости диэлектриков ввиду того, что при небольшой выдержке образца регистрируется не только сквозной ток i_{ym} , но и сопровождающий его ток абсорбции $i_{a\bar{b}}$, вследствие чего может создаться неправильное представление о большой проводимости.

Принято, что измерение электропроводимости производится на постоянном токе и через одну минуту после включения образца в цепь, что позволяет исключить тока поляризации.

Сопротивление изоляции диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на величину тока i_{ym} , измеренного через одну минуту после включения напряжения

$$R_{uz} = \frac{U}{i_{ym}} \quad (3.3)$$

При постоянном напряжении абсорбционные токи протекают только в момент включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они имеют место в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Ток в цепи с диэлектриком при переменном напряжении обычно на несколько порядков превышает ток сквозной электропроводимости i_{ym} , т.к. при изменении полярности приложенного напряжения основную роль играют поляризационные процессы.

1.2 Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называется часть электрической энергии, превращаемой в диэлектрике в тепловую, теряемая под воздействием приложенного напряжения. Величина диэлектрических потерь характеризуется мощностью, затрачиваемой на нагрев диэлектрика. Для определения этой мощности рассмотрим упрощенную схему замещения диэлектрика (рис. 3.2).

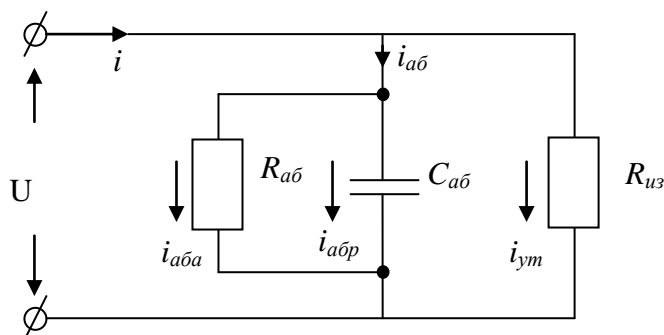


Рисунок 3.2– Упрощенная схема замещения диэлектрика

Ток, сопутствующей электронной и ионной поляризациям, протекает мгновенно и происходит без потерь. Поэтому эти потери в схеме замещения не учитываются.

Дипольная поляризация осуществляется в большие промежутки времени и связаны с потерями энергии. Поэтому диэлектрик представлен с идеальным конденсатором с параллельно включенным активным сопротивлением. Механизм поляризации при постоянном и переменном напряжениях отличны друг от друга, рассмотрим величину диэлектрических потерь по отдельности.

При постоянном напряжении ток абсорбции $i_{a\bar{b}}$ протекает только в момент включения напряжения, а затем он прекращается (в пределах до 60 сек.). Следовательно, при включении диэлектрика под постоянное напряжение, диэлектрические потери обусловлены только током утечки i_{ym} и определяются по выражению

$$P = i_{ym}^2 \cdot R_{uz}, \text{ Вт} \quad (3.4)$$

где R_{uz} – сопротивление изоляции; i_{ym} – ток утечки (или ток сквозной проводимости).

В диэлектриках ток утечки весьма мал, следовательно, малы и диэлектрические потери.

Если диэлектрик включить под переменное напряжение, то два тока ($i_{a\bar{b}a}$ и i_{ym}) будут протекать в цепи с диэлектриком в течение всего времени, пока он будет находиться под переменным напряжением. Эти токи можно изобразить в виде векторной диаграммы (рис. 3.3).

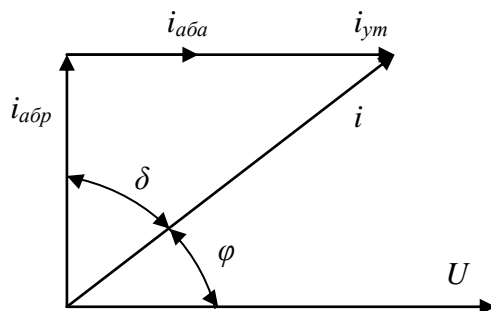


Рисунок 3.3– Векторная диаграмма токов

Напряжение отложим в виде горизонтально расположенного вектора. Ток абсорбции $i_{a\bar{b}}$ состоит из реактивной $i_{a\bar{b}p}$ и активной составляющей $i_{a\bar{b}a}$. Реактивную составляющую тока абсорбции $i_{a\bar{b}p}$ изобразим вектором, перпендикулярным к вектору U , а активную составляющую $i_{a\bar{b}a}$ и ток утечки i_{ym} – перпендикулярно к реактивной составляющей. В результате сложения векторов получим общий ток в цепи с диэлектриком i .

Угол между вектором общего тока i и напряжения называют углом сдвига фаз, и обозначают греческой буквой φ , а угол между суммарным током i и вектором реактивного тока абсорбции $i_{a\bar{b}p}$ обозначают греческой буквой δ и называют углом диэлектрических потерь.

Мощность, затрачиваемая на нагрев диэлектрика (диэлектрические потери) равна:

$$P = U (i_{a\bar{b}a} + i_{ym}) \quad (3.5)$$

Из векторной диаграммы токов находим

$$\frac{i_{a\bar{b}a} + i_{ym}}{i_{a\bar{b}p}} = \operatorname{tg} \delta \quad (3.6)$$

Из (3.6) величина активной составляющей тока в диэлектрике равна

$$i_{a\bar{b}a} + i_{ym} = i_{a\bar{b}p} \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (3.7)$$

Реактивный ток абсорбции определим по выражению

$$i_{a\bar{b}p} = U \cdot \omega \cdot C \quad (3.8)$$

где C – емкость, конденсатор.

Подставляем (3.8) в выражение (3.7), получим

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (3.9)$$

Из выражения (3.9) следует, что при заданной величине U , ω и C диэлектрические потери зависят только от $\operatorname{tg} \delta$.

$\operatorname{tg} \delta$ определяет величину активной мощности, теряемой в диэлектрике под действием переменного напряжения. Чем больше потери в диэлектрике, тем больше угол диэлектрических потерь δ . Значение $\operatorname{tg} \delta$ характеризуется активной составляющей тока абсорбции $i_{a\bar{b}a}$ и током утечки i_{ym} , которые могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от состояния диэлектрика. Увлажнение, загрязнение, наличие примесей в диэлектрике увеличивают $i_{a\bar{b}a}$ и i_{ym} . Чем меньше значение $\operatorname{tg} \delta$, тем лучше диэлектрик, т.к. в нем будут меньше потери энергии. Последние вызывают нагрев диэлектрика и преждевременное его разрушение. Для современных диэлектриков $\operatorname{tg} \delta$ находится в пределах от 0,0001 до 0,05.

1.3 Электропроводность в жидких диэлектриках

В качестве жидких диэлектриков в электротехнических устройствах применяют минеральные нефтяные масла и синтетические жидкие диэлектрики, как совол и совтол.

Наибольшее применение имеют минеральные нефтяные масла. По характеру использования они могут быть разделены на три группы:

I. Масла для силовых трансформаторов и высоковольтных выключателей;

II. Кабельные масла, используемые для пропитки бумажной изоляции высоковольтных кабелей;

III. Конденсаторные масла, применяемые для пропитки бумажной изоляции конденсаторов.

Жидкие диэлектрики характеризуются примесной и собственной электропроводностью.

Все жидкие диэлектрики легко загрязняются, причем характер загрязнений может быть различным. В качестве загрязнений можно рассматривать примеси, имеющие в данном диэлектрике по его природе, например органические кислоты в трансформаторном масле. Загрязнения в жидком диэлектрике является и вода, попадающая в него часто непосредственно от атмосферного воздуха. При этом следует иметь в виду, что вода в жидком диэлектрике может быть в трех состояниях:

–молекулярно- растворенном;

– в виде эмульсии(в виде мельчайших капелек, находящиеся в жидком диэлектрике во взвешенном состоянии);

–в виде избыточной воды, не удерживающейся в эмульсии, выпадающей из нее.

Вода в жидком диэлектрике может переходить из одного состояния в другое. При повышении температуры раствора обычно увеличивается и эмульсионная вода может переходить (полностью или частично) в молекулярно-растворенное состояние, а избыточная вода – эмульсионное состояние. А при снижении температуры происходит обратный процесс.

Загрязнения жидкого диэлектрика увеличивает электропроводность.

Собственная электропроводность жидкого диэлектрика имеет ионный характер. Она определяется переносом электрическим полем ионов, образовавшихся вследствие частичной диссоциации основных молекул жидкости. Степень диссоциации молекул жидкого диэлектрика зависит от структуры: нейтральные жидкие диэлектрики (трансформаторные масла) имеют меньшую электропроводность, чем полярные. Сильнополярные жидкости, например, дистиллированная вода, отличается настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью. Полярные диэлектрики, применяемые в электротехнических установках –это совол исовтол.

Во всех технических жидких диэлектриках примесная электропроводность играет очень большую роль; она часто оказывается больше собственной электропроводности, особенно в случае нейтральной жидкости.

Очистка жидких диэлектриков от содержащихся в них примесей дает заметное снижение их электропроводности. Однако полностью удалить из жидкого диэлектрика способные к диссоциации примеси невозможно, что затрудняет получение электроизоляционных жидкостей с малыми значениями удельной проводимости.

1.4 Электропроводность в газообразных диэлектриках

Газы в электрических аппаратах находят самое широкое применение. В осветительной технике широко применяют инертные газы – неон, гелий, аргон, а так же азот, пары ртути и натрия. Для интенсивного охлаждения мощных электрических машин применяются водород, а для повышения электрической прочности кабелей применяются элегаз. Инертные газы используются в газотронах, тиратронах и других газонаполненных приборах (газоразрядниках, фотоэлементах и т. д.).

Но самую важную роль в работе электротехнических играет воздух, который, как известно, представляет смесь кислорода и азота (21 % кислорода, 78 % азота).

Как и всякий газ, он при любой степени понижения давления, сохраняет свой состав; ни одно твердое тело не обладает такой однородностью состава. Отсутствие диэлектрических потерь принадлежит к числу важных свойств газа. Малая диэлектрическая проницаемость так же является ценным свойством газов и принимают практически равной 1,0.

Только хорошие электроизоляционные свойства воздуха делают возможным сооружение правых (линии электропередачи, сборные шины распределительных устройств, в том числе и работающих при высоких напряжениях).

Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают исключительно малой проводимостью. Это объясняется тем, что в нормальных условиях число заряженных частиц (ионов и свободных электронов) в них мало. Ток в газах может существовать только при наличии в них ионов или свободных электронов, которые возникают в результате ионизации молекул газа.

Ионизация происходит либо под действием внешних факторов, либо под действием ударной ионизации. К числу внешних факторов относятся космические лучи, радиоактивное излучение, а так же термическое воздействие (сильный нагрев газа).

Ударная ионизация происходит вследствие соударений ионов и электронов, ускоренных электрическим полем с молекулами газа. Свободные электроны, находящиеся в газе под действием приложенного напряжения, приобретает равноускоренное движение. Скорость движущихся электронов может достигнуть такой величины, когда их энергия будет достаточной для выбивания электронов при ударе со встречными молекулами. Выбитые из молекул электроны, двигаясь под действием приложенного напряжения, так же могут выбивать электроны. Молекулы газа, из которых выбиты электроны, становятся ионами. Поэтому этот процесс носит название ионизации газа. Ударная ионизация газа всегда сопровождается свечением газа. При возникновении ионизации электропроводность газов увеличивается.

Одновременной ионизацией происходит обратный процесс – рекомбинация. Явление рекомбинации заключается в том, что часть положительных ионов, соединяясь с отрицательными частицами, образуют молекулы.

Рекомбинация препятствует безграничному росту числа ионов в газе и приводит к тому, что спустя короткое время после начала действия внешнего ионизатора устанавливается определенная концентрация ионов. На рис. 2.6 показан характер зависимости тока в газе от напряжения.

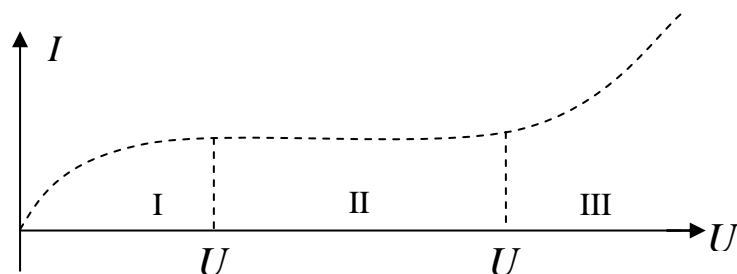


Рисунок 3.3– Зависимость тока в газе от напряжения

Кривая ионизации состоит из трех участков:

I – участок соответствует области выполнения закона Ома, когда число положительных и отрицательных ионов можно считать постоянным. Ток пропорционален напряжению на газовом промежутке, а плотность тока пропорциональна напряженности поля.

II – участок – это зона самостоятельного разряда. По мере возрастания величины напряжения ионы уносятся к электродам, не успевая рекомбинироваться, и при некотором напряжении все ионы, создаваемые в газовом промежутке, будут нейтрализоваться на соответствующих электродах. Дальнейшее увеличение напряжения не будет вызывать увеличение тока. Но при увеличении напряжения ток постоянным до тех пор, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов.

III – участок – зона самостоятельного разряда. При $U > U_2$ свободные заряды развивают большую скорость и приобретают кинетическую энергию, достаточную для выбивания электрона из молекулы при столкновении с ней. Отделившиеся электроны быстро разгоняются электрическим полем и при столкновении с молекулой выбивают новые из нее электроны. Далее начинает развиваться явление ударной ионизации, в результате которого число

заряженных частиц в газе быстро нарастает (образование “ионной лавины”) и газ начинает проводить электрический ток, т.е. происходит его пробой.

Вопросы для самоконтроля

1. Привести эквивалентную схему диэлектрика.
2. Какие токи протекают в цепи с диэлектриком.
3. Упрощенная схема замещения диэлектрика.
4. Вывести формулу диэлектрических потерь.
5. Объяснить сущность диэлектрических потерь.
6. Область применения жидких диэлектриков.
7. Объяснить электропроводность в жидких диэлектриках.
8. Электропроводность в газообразных диэлектриках.
9. Объяснить зависимость тока в газовых диэлектриках от напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев, И.А. Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.
4. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.
5. Шустов, М.А. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов /М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.

Лекция 4

ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1.1 Пробой твердых диэлектриков

Различают три вида пробоя твердых диэлектриков: *электрический, тепловой и электрохимический*.

1.1.1 Электрический пробой

Потеря у диэлектрика электрополяризационных свойств, возникающая при некотором критическом значении приложенного напряжения U_{np} , называется *пробоем диэлектрика*, а критическое значение U_{np} – *пробивным напряжением*. Таким образом, при пробое нарушается электрическая прочность диэлектрика. На рис. 4.1. показан механизм пробоя диэлектрика.

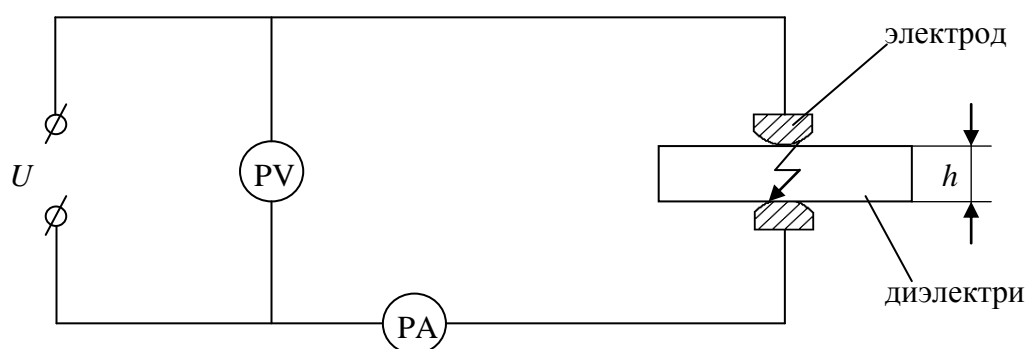


Рисунок 4.1– Механизм пробоя диэлектрика

Увеличивая напряжение, приложенное к образцу диэлектрика, можно прийти до такого значения напряжения, при котором диэлектрик, в какой-то части своего объема теряет диэлектрические свойства и превращается в проводник. При этом между электродами проходит больше ток, и образец оказывается замкнутым накоротко. Это явление носит название пробоя диэлектрика.

Свойство диэлектрика выдерживать напряжение без пробоя называется электрической прочностью. Для оценки электрической прочности диэлектриков пользуются понятием *пробивной напряженности*, численно характеризующейся отношением пробивного напряжения U_{np} к толщине образца h .

Электрическая прочность является важнейшей электрической характеристикой диэлектрика. Если у диэлектрика неудовлетворительное значение E_{np} , то происходит пробой. В этом случае изоляция пропускает ток и при этом электротехническое изделие, в котором используется эта изоляция, выходит из строя. Пробой изоляции генератора, трансформатора или силового кабеля – это серьезная авария в энергосистеме. А пробой изоляции электродвигателей приводит к остановке технологической машины.

Механизм этого пробоя объясняется непосредственным разрушением структуры диэлектрика силами электрического поля. Он возникает тогда, когда напряженность электрического достигает величины, достаточной для вырывания из атомов вещества электронов и образования потока свободных электронов. Электрический пробой происходит почти мгновенно ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ сек), не обусловлен тепловой энергией и обычно происходит при включении электрического напряжения больше, чем номинальный или при резком его скачке. Он не зависит t температуры диэлектрика или окружающей среды. По своей природе электрический пробой является чисто электронным процессом, приводящий к разрушению материала (растрескиванию, образованию отверстия на пути прохождения тока и т. д.).

1.1.2 Тепловой пробой

Тепловой пробой имеет место при повышенной проводимости, больших диэлектрических потерях, при нагреве диэлектрика посторонними источниками тепла или при плохом теплоотведении.

Механизм теплового пробоя состоит в следующем. Из-за неоднородности состава технических диэлектриков отдельные его объемы имеют повышенную проводимость. Они расположены в диэлектрике в виде тонких каналов, проходящих через всю его толщину. В одном из таких каналов увеличивается плотность тока и выделяется значительное количество тепла. Сопротивление этого участка резко снижается, что приводит к еще большему возрастанию тока. Выделение тепла на этом участке продолжается и достигает для теплового разрушения (расплавления, обугливания, сгорания и т.д.).

Твердые диэлектрики являются более или менее плохими проводниками тепла, что связано с их теплопроводностью. Величина диэлектрических потерь в них, как правило, сильно возрастает с ростом температуры. В этом заключается предпосылка к электротепловому пробую.

Возможность электротеплового пробоя сводится к вопросу теплового равновесия: если количество тепла, выделяющиеся внутри диэлектрика за счет диэлектрических потерь, будет все время больше количества тепла, выделяющийся в окружающую среду, то тепловой пробой неизбежен при достаточно длительном приложении напряжения.

На рис. 4.2 представлен график зависимости выделенного и отдаваемого тепла в окружающую среду в диэлектрике от температуры.

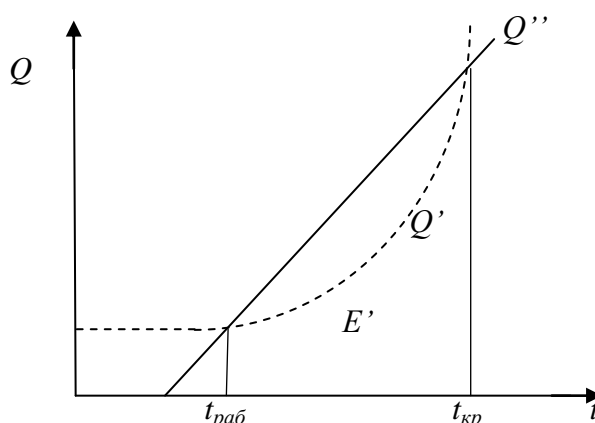


Рисунок 4.2– График зависимости выделенного и отдаваемого тепла в окружающую среду от температуры

При сравнительно небольшой напряженности поля E' , которой соответствует кривая выделяющегося в диэлектрике тепла Q' , температура внутри диэлектрика повысится до рабочей $t_{раб}$, при котором наступит тепловое равновесие $Q' = Q''$. При этих напряженностях электрического поля E' диэлектрик будет работать без опасности теплового пробоя; но при изменении условий, например, повышении окружающей среды, что ухудшает теплоотдачу диэлектрика, может поднять температуру в диэлектрике до величины $t_{кр}$. Если нагрев за счет посторонних источников увеличит температуру выше $t_{кр}$, то Q' увеличивается настолько, что выделяемая мощность превысит отводимое количество тепла. Температура диэлектрика начнет возрастать вплоть до полного его разрушения.

1.1.3 Электрохимический пробой диэлектриков

Основными причинами этой формы пробоя являются химические реакции, возникающие в диэлектрике под влиянием электрического поля, например, разложение диэлектрика, восстановление окислов при ионизации, электролиз и т.д. В результате этих реакций в материале появляются продукты с пониженными электрическими характеристиками, а это, в свою очередь, развивает процессы электрического и теплового пробоя. Процесс

электрохимического пробоя в отличие от электрического, требует достаточного длительного времени.

Электрический пробой часто называют старением диэлектрика. *Старение диэлектриков* – это процесс постепенного снижения электрической прочности со временем, это может исчисляться месяцами и даже годами.

1.2 Пробой газообразных диэлектриков

Пробой газа происходит в виде искрового разряда, т.е. светящихся искр, соединяющих поверхности металлических электродов, помещенных в газовой среде. Далее этот искровой разряд может переходить в электрическую дугу при достаточной мощности источника тока. Так происходит при однородном электрическом поле (примером газового промежутка с равномерным полем может служить промежуток между двумя шаровыми электродами). Однородное поле можно получить также между плоскими электродами с закругленными краями. Однородным электрическим полем называется такое поле, во всех точках которого силы электрического поля равны между собой, а плотность силовых линий всюду одинакова.

На практике в основном встречается пробой в неоднородном поле. Неоднородное поле возникает между остриями ($\rightarrow\leftarrow$), острием и плоскостью ($\rightarrow\perp$), между проводами линий электропередач ($\bullet\bullet$) и т.д.

Пробой газа в неоднородном электрическом поле проходит через ряд промежуточных стадий (рис. 4.3)

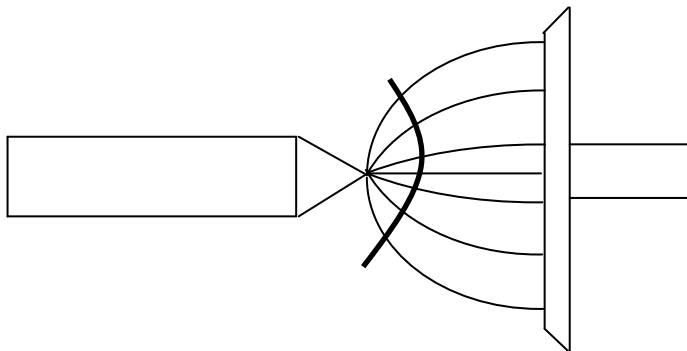


Рисунок 4.3– Пробой газа в неоднородном поле

I – Вначале наступает неполное электрическое разрушение слоя газа (невидимая корона) у электрода с острием, т.к. у его поверхности наблюдается наибольшие напряженности электрического поля. По мере удаления от такого электрода величина напряженности уменьшается, также уменьшается густота силовых линий. При этом их ионизирующее действие на частицы газа снижается.

II – При напряжении, превышающем напряжение невидимой короны, у поверхности электрода с острием в газе возникает коронирующий разряд – видимая электрическая корона. Она представляет собой светло-фиолетовое свечение в слое воздуха около электрода – острие.

III – При дальнейшем повышении напряжения, коронирующий разряд переходит в кистевой. При этом в слое газа около электрода острие образуется ряд светящихся веточек – кистей, берущих свое начало у поверхности электрода – острие. Явление кистевого разряда указывает на дальнейшее электрическое разрушение газообразного диэлектрика.

IV – При достижении величины критического напряжения одна из светящихся кистей перерастает в искру. Искра в момент пробоя перекрывает весь слой газа от одного электрода до другого.

Явление пробоя газов представляет интерес по тому, что все изоляционные конструкции работают в газовой среде, будучи окруженные воздухом. Кроме того, для ряда целей специально применяют газовую изоляцию, например, воздух в качестве диэлектрика используется в воздушных и специальных газонаполненных кабелях, воздушных выключателях и т.п. Провод линий передачи высокого напряжения, подвешенные на фарфоровых изоляторах к мачтам на всем протяжении между мачтами, изолированы один от другого слоем воздуха.

1.3 Пробой жидких диэлектриков

Для жидких диэлектриков, как и для газовых, пробой носит ионизированный характер и также обусловлен развитием ударной ионизации. Однако для жидкости длина свободного пробега ионов (средняя длина пути между столкновениями) резко снижена по сравнению с газом ввиду резко увеличенной плотности, и поэтому пробивное напряжение для жидких диэлектриков выше, чем у газов. Очищенные жидкие диэлектрики имеют пробивное напряжение намного выше, чем диэлектрики, в которых имеются примеси.

Наличие загрязнений в жидкости снижают ее электрическую прочность, т. к. под действием электрического поля на жидкий диэлектрик частицы загрязнений располагаются по линиям электрического поля в виде цепочек между электродами, образуя «мостик», по которым и происходит пробой жидкости.

При наличии в жидкости пузырьков газа пробой начинается с пузырьков, как газовый пробой, а затем уже переходит в пробой жидкости.

На рис. 4.4 показано влияние влаги и механических загрязнений на электрическую прочность трансформаторного масла.

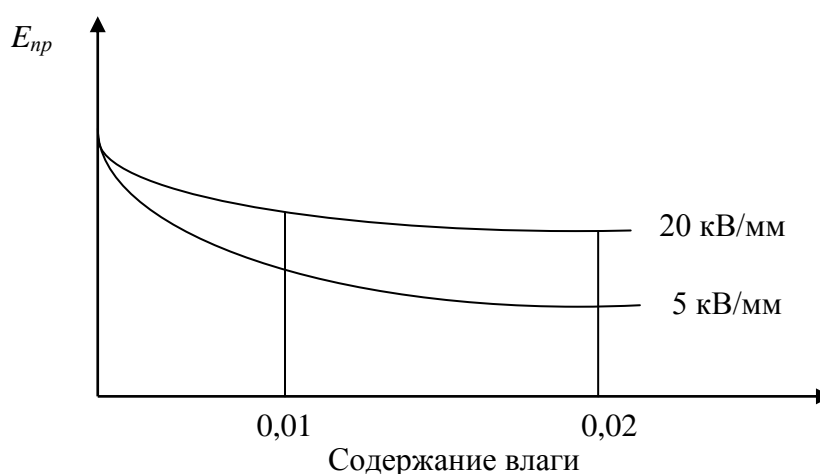


Рисунок 4.4—Влияние влаги и механических загрязнений на электрическую прочность трансформаторного масла

Кривая 1 (рис. 4.4) соответствует маслу, тщательно очищенному от механических примесей, в этом случае влияние влаги относительно невелико, кривая 2 получена для масла, в которое были введены механические загрязнения. В этом случае даже ничтожное количество поглощения влаги (0,01%) уже дает резкое снижение $U_{пр}$. Поэтому жидкие диэлектрики при использовании их в электрических аппаратах подвергаются механической очистке на фильтр — прессах, центрифугах и т.д. Только после такой обработки масло заливается в электрический аппарат (трансформатор, конденсатор и т.п.)

Вопросы для самоконтроля

1. Объяснить механизм пробоя диэлектрика.
2. Электрический пробой твердых диэлектриков.
3. Понятие электрической прочности изоляции.
4. Механизм пробоя газообразных диэлектриков.
5. Пробой газа в однородном поле.
6. Пробой газа в неоднородном поле.
7. Механизм пробоя в жидких диэлектриках.
8. Влияние влаги и механических загрязнений на электрическую прочность в жидких диэлектриках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев, И.А. Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.
4. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.
5. Шустов, М.А. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов /М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.

Лекция 5

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

1.1 Механические и физико-химические свойства диэлектриков

В процессе эксплуатации диэлектрика подвергается воздействию не одного только электромагнитного поля, но и ряда других факторов: механических нагрузок, повышенных или пониженных температур, влажности внешней среды и т.д. Поэтому качество диэлектрических материалов и надежность их работы определяются не только электрическими, но и многими физико-химическими свойствами. Твёрдые диэлектрики испытывают разные виды механической нагрузки, как например, подведённые изоляторы, на которые подвешены линии электропередач. Большие нагрузки возникают под действием электромагнитных сил, а в двигателях, генераторах – на изоляцию создается центробежные усилия.

Весьма серьезной эксплуатационной нагрузкой является тепловое воздействие. В большинстве случаев изоляционным материалом приходится работать при повышенных температурах, вызванных потерями энергии в электротехнических материалах, также при повышении окружающей температуры.

В жидких диэлектриках повышенная температура вызывает различного вида разложения, например, окислительный процесс. Окислительному процессу особенно сильно подвержено трансформаторное масло. При достаточно высокой температуре могут произойти вспышка паров, выделяемых маслом, и его воспламенением.

В твердых диэлектриках повышенная температура вызывает соответствующие изменения электротехнических характеристик и снижение механических характеристик. Кроме того, повышенная температура различает большинство твёрдых диэлектриков.

1.1.1 Механические свойства диэлектриков

Поскольку детали из диэлектрических материалов подвергаются воздействию механических нагрузок, большое практическое значение имеет прочность этих материалов и способность их не деформироваться под действием механических напряжений.

Механические свойства диэлектриков определяются известными прочностными зависимостями, а именно:

$$\text{Пределом прочности при сжатии: } \sigma = \frac{P}{F}, \text{ кг/м}^2;$$

$$\text{Пределом прочности при растяжении: } \sigma = \frac{P}{b \cdot h}, \text{ кг/м}^2;$$

$$\text{Пределом прочности при изгибе: } \sigma = 1,5 \cdot \frac{P \cdot l}{b \cdot h}, \text{ кг/м}^2.$$

где P – разрушающая нагрузка, кг; F – первоначальная площадь поперечного сечения образца, м²; l – длина образца, м; b – ширина образца до испытания, м; h – высота образца до испытания, м.

При определении прочности на растяжение важной характеристикой материала является относительное удлинение при разрыве, определяемое отношением удлинения Δl материала при разрыве к длине испытываемого образца l_0 :

$$K = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Гибкость (эластичность) – это способность материала под действием растягивающих усилий значительно удлиняться без остаточной деформации. Примером этих материалов является каучук, мягкие резины и т.д. После снятия нагрузки они стремятся восстановить свои первоначальные размеры и форму.

1.1.2 Физико-химические свойства диэлектриков

Важнейшим к физико-химическим свойствам диэлектриков относятся:

- *Нагревостойкость;*
- *Морозостойкость;*
- *Температура размягчения, вспышки, воспламенения;*
- *Вязкость;*
- *Кислотность;*
- *Дугостойкость;*
- *Гигроскопичность.*

Нагревостойкость – это способность электроизоляционного материала сохранять рабочие свойства при длительном воздействии повышенной температуры.

Большинство изоляционных материалов работают в условиях повышенных температур (изоляция электрических машин, проводов, кабелей и т.д.). Практически важные качественные показатели электрической изоляции при повышении температуры в большинстве случаев ухудшаются. Поэтому большое значение приобретает вопрос о способности электрической изоляции выдерживать повышенную температуру без существенного уменьшения эксплуатационной надёжности электрооборудования. Вопрос о повышении предела допустимых рабочих температур имеет чисто практическое значение. Так, например, в электрических машинах увеличение допустимого превышения температуры выше нормативной, даёт возможность получить более высокую мощность в неизменных габаритах или же при сохранении мощности достичь уменьшения габаритных размеров, массы и стоимости изделия.

ГОСТ предусматривает разделение электроизоляционных материалов для электрических машин, трансформаторов и аппаратов на классы нагревостойкости, для которых фиксируются наибольшие допустимые рабочие температуры при использовании их длительно в нормальных эксплуатационных условиях. При этих температурах обеспечиваются технико-экономические целесообразные сроки службы этого оборудования. Превышение рабочих температур выше допустимой приводит к заметному ухудшению электрических параметров изоляционных материалов и как следствие, сокращению срока службы электрооборудования.

В табл. 5.1 приведены обозначения и предельные температуры классов нагревостойкости, а также примеры электроизоляционных материалов, относящихся к этим классам.

Таблица 5.1 – Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Обозначение класса нагревостойкости	Допустимая предельная температура, °С	Примеры электроизоляционных материалов, отнесённых к соответствующему классу
<i>У</i>	90	Непропитанные волокнистые материалы (бумага, картон, хлопчатобумажное волокно, пряжа, древесина, шёлк, каучук и т.д.)
<i>А</i>	105	Материала класса <i>У</i> , но пропитанные лаками (масляными, масляно-смоляными и др.)
<i>Е</i>	120	Материалы на основе эпоксидных смол (гетинакс, текстолит), а также изоляция эмаль-проводов.
<i>В</i>	130	Неорганические диэлектрики в сочетании с обычными лаками (стекловолокно, асбест, стеклотекстолит, слюда и др.)
<i>F</i>	155	Материалы класса <i>В</i> , но пропитанные с более нагревостойкими связующими составами
<i>Н</i>	180	Материалы класса <i>В</i> , но пропитанные с особо нагревостойкими кремнеорганическими составами.
<i>С</i>	Свыше 180	Чистые органические диэлектрики (слюда, фарфор, стекло, кварц и др.)

Морозостойкость – это способность материала работать без ухудшения эксплуатационных свойств при низких температурах, т.е. без значительного снижения механической прочности, гибкости, образование трещин и т.д. Поэтому при нормативной документации нижний предел допустимых отрицательных рабочих температур выделяется. Хотя при низких температурах электрические свойства электрооборудования улучшаются, но многие электроизоляционные материалы становятся не эластичными, хрупкими. Так, резина при температуре – 60°C становится хрупкой как стекло; провода с полихлорвиниловой изоляцией рекомендовано разматывать с барабана или производить какие-либо механические операции при температуре не ниже 10°C.

Температура размягчения – это температура, при которой материал при нагреве переходит постепенно из твёрдого состояния в жидкое (примером могут служить аморфные диэлектрики: смолы, пластмассы).

Температурой вспышки называют температуру жидкости, при нагреве которой смесь паров её с воздухом вспыхивают при поднесении к ней небольшого пламени.

Температура воспламенения – это ещё более высокая температура, при которой при поднесении пламени загорается испытываемая жидкость.

Эти характеристики предоставляют особый интерес при оценке качества трансформаторного масла, растворителей и др., применяется при производстве электроизоляционных лаков.

Для жидких и полужидких электроизоляционных материалов важной механической характеристикой является *вязкость*. Вязкость вещества тесно связана с пропитывающей способностью жидких диэлектриков. С возрастанием вязкости пропитывающая способность жидкого диэлектрика будет уменьшаться. Чем меньше вязкость пропитывающих изоляционных составов, тем глубже проникают частицы пропиточного состава в поры изоляции.

Вязкость также характеризует охлаждающие и диэлектрические свойства жидких диэлектриков.

Определение вязкости происходит с помощью вискозиметров.

Кислотность оценивается содержанием кислот в жидком диэлектрике и характеризует состояние этого диэлектрика с точки зрения необратимых физико-химических процессов его разложения. Многие диэлектрики – трансформаторное масло, лаки и др. под действием электрического поля или нагрева окисляются. При этом образуются органические кислоты, количество которых определяется кислотным числом. Под кислотным числом понимают количество миллиграммов одного едкого кали (KOH), необходимого для нейтрализации всех свободных кислот в 1 гр. испытываемого диэлектрика. Чем выше кислотное число, тем больше свободных кислот в жидком диэлектрике, тем выше его проводимость (кислоты легко распадаются на ионы). Например, кислотное число в трансформаторном масле должно быть не более . Кислоты могут разрушать изоляционные материалы, с которым прикасается жидкий диэлектрик, а также могут вызвать коррозию металлов.

Дугостойкость характеризует способность материала сопротивляться воздействию электрической дуги. Электроизоляционные материалы, применяемые в качестве оснований (панелей) в выключающей аппаратуре, как например, в контакторах, переключателях и др. подвергаются частому воздействию электрических искр и электрической дуги. При этом поверхность электроизоляционных материалов (пластмассы) повреждаются с образованием науглерожанных следов-мостиков. Последние, располагаясь между контактами, замыкают их, нарушая нормальную работу аппарата.

Гигроскопичность называется способность материала впитывать в себя влагу из окружающего воздуха. Многие электроизоляционные материалы, применяемые в электротехнических устройствах, гигроскопичны. Вследствие этого они снижают свои диэлектрические свойства. С поглощением влаги в электроизоляционных материалах увеличивается ток утечки, который может привести к короткому замыканию электрической аппаратуры.

Лучшей влагостойкостью обладают неорганические диэлектрики – фарфор, стекло, слюда и т.п.

Песчаные электроизоляционные материалы поглощают относительно много влаги, и их диэлектрические свойства при этом сильно ухудшаются. Особенно легко увлажняются электроизоляционные материалы на основе целлюлозы (бумага, картон, ткани и др.). Эти материалы можно использовать только в сухом состоянии, причем они должны защищаться от увлажнения различными способами (лакированием, пропиткой). Однако все виды защиты лишь замедляют процесс увлажнения, но не могут его остановить.

Короностойкость. Многие электроизоляционные материалы работают в машинах и устройствах высокого напряжения, где могут возникнуть электрические разряды в местах с большой напряженностью электрического поля (электрическая корона). Под действием последней в воздухе образуется озон и окиси азота, действующие разрушающе на ряд изоляционных материалов. Поэтому возникает необходимость определять короностойкость изоляционных материалов.

Методы определения этой характеристики у различных групп материалов различны, но все они имеют целью установить начало разрушения материала в процессе непрерывного воздействия на него электрического разряда.

1.2 Краткие сведения о конкретных диэлектриках

1.2.1 Твёрдые диэлектрики

Волокнистые материалы. В электрических устройствах широкое применение нашли *органические* и *неорганические* волокнистые материалы. К *органическим* волокнистым материалам относится *дерево, бумага, картон*, текстильные материалы из естественного и искусственного волокна. К *неорганическим* волокнистым материалам относятся *асбест, фибра, стеклянное волокно* и др. Волокнистые материалы прочны, гибки, удобны для обработки и дешевы. К недостаткам их относится гигроскопичность. Для устранения этого недостатка, а также с целью улучшения диэлектрических свойств, применяются пропитанные волокнистые материалы.

Бумага, картон. Основное сырье для изготовления бумаги – древесная целлюлоза. В электротехнических устройствах применяются следующие сорта изолирующих бумаг: конденсаторная, намоточная, кабельная, телефонная и др.

Электротехнические картоны изготавливаются тем же способом, что и бумага, но они имеют большую толщину (от 0,1 до 3 мм). Картоны, предназначенные для работы на воздухе, так называемые «воздушные картоны» типа ЭВ имеют более плотную структуру. Картоны, применяемые в маслonaполненных машинах и аппаратах (трансформаторах и др.) типа ЭМ, имеют рыхлую структуру. Поэтому хорошо пропитываются маслом.

Воздушные картоны применяются для пазовой и межвитковой изоляции в электрических машинах низшего напряжения. При малых толщинах (0,1 – 0,8 мм) картон изготавливают в рулонах, как и бумагу, а при большей толщине (1 – 3 мм) – в листах.

Фибра. Фибра выпускается в виде листов, стержней и трубок, которые применяются в качестве электроизоляционного материала в низковольтной аппаратуре. Кроме того, фибра применяется в высоковольтных разрядниках для гашения дуги, под действием которой происходит импульсивное выделение газа из фибры. Дуга гасится в результате повышения давления газов внутри разрядника. Для электротехнических щелей используется листовая фибра толщиной от 0,6 до 12 мм.

В электротехнических машинах низкого напряжения фибра применяется в качестве пазовых клиньев и прокладок.

Одним из недостатков фибры – её большая гигроскопичность. Фибра хорошо поддается механической обработке, вплоть до штамповки. Она выдерживает длительный нагрев до температуры 100 °С.

Асбест. Основным преимуществом асбеста является его высокая нагревостойкость (до 450°С). Прочность и гибкость асбеста сохраняется даже при высокой температуре. При температуре в пределах 700°С асбест разрушается.

Для электрической изоляции из асбеста изготавливается пряжа, лента, ткани и другие изделия. Асбестовые материалы обладают не очень высокими электроизоляционными

свойствами(электрическая прочность в пределах 3-5 кВ, плотность 108-109 Ом·см) и большой гигроскопичностью, то их обычно пропитывают лаками, что повышает их электрические характеристики и понижает гигроскопичность.

Лакоткани. Они представляют собой гибкие рулонные материалы, состоят из какой-либо тканевой основы, пропитанной электроизоляционным лаком. В качестве тканевых основ применяют хлопчатобумажные, шёлковые, стеклянные ткани.

Лакоткани находят широкое применение в качестве пазовой изоляции в электрических машинах низкого напряжения, а также в трансформаторах. Кроме того, лакоткани применяют для наружной изоляции катушек и жгутов в электрических аппаратах и приборах.

В соответствии применяемой тканевой основой лакоткани делят на хлопчатобумажные, шёлковые и картонные.

Слоистые пластинки. Слоистые пластинки обладают высокими механическими, термическими и диэлектрическими свойствами, поэтому они нашли широкое применение в электротехнических устройствах.

Слоистые пластинки состоят из волокнистой основы связующего материала. В качестве волокнистой основы применяется бумага, хлопок, асбест, стекло, а связующими материалами чаще всего используются искусственные смолы: эпоксидные, кремнеорганические, полиэфирные и др.

К слоистым пластинкам относятся: *гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, древесно-слоистые пластинки* и др.

Гетинакс представляет собой слоистый материал, изготовленный методом горячего прессования из бумаги, пропитанной фенолформальдегидной смолой.

Гетинакс не обладает высокой стойкостью к действиям кислот и щелочей, но устойчив к воздействию жиров и минеральных масел. Под действием электрической дуги гетинакс очень быстро обугливается и становится проводящим. Гетинакс в основном применяется для изготовления шайб, прокладок и т.п., выпускается в виде листов, стержней, трубок. Гетинакс имеет следующие электрические свойства: $\varepsilon = 7 \dots 8$, $\rho_v = 1010 \dots 1011 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $\text{tg}\delta = 0,04 \dots 0,08$, $E_{np} = 15 \dots 30 \text{ кВ/мм}$.

Текстолит представляет собой прессованный материал, изготовленный из ткани, пропитанной фенолформальдегидной смолой. В сравнении с гетинаксом текстолит обладает более низкими электроизолирующими свойствами, которые в условиях с повышенной влажностью снижаются ещё более резко, чем у гетинакса. По механическим свойствам текстолит имеет преимущества в сравнении с гетинаксом по твёрдости, прочности на удар и способности механической обработке без растрескивания и без сколов. По химической стойкости и действиям дуги текстолит примерно равноценен гетинаксу. Текстолит обрабатывается механическим путём также как гетинакс. Листовой текстолит применяется в качестве конструкционных электроизоляционных материалов. Текстолит имеет следующие диэлектрические свойства: $\varepsilon = 5 \dots 10$, $\rho = 1010 \dots 1012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $\text{tg}\delta = 0,02 \dots 0,08$, $E_{np} = 2 \dots 12 \text{ кВ/мм}$. По теплостойкости текстолит и гетинакс относятся к классу *E* (допускается температура 120 °С).

Стеклотекстолит – это материал, в качестве основы которого используется стеклоткань, а в качестве связующего – различные синтетические терморезистивные смолы. Они отличаются весьма высокими механическими и электрическими свойствами, которые более стабильны при воздействии влаги, чем у текстолитов. Они обладают повышенной теплостойкостью (до 200...300°С).

Слюдяные диэлектрики. Их можно разделить на природные (мусковит, флогопит) и искусственные (миканит, микафолит, микалента). Слюда имеет хорошие электрические характеристики, высокую нагревостойкость и большую механическую прочность. Обладает химической стойкостью и малой гигроскопичностью, хорошо переносит резкие изменения температуры. Для щелей изоляции применяют два вида слюды: мусковит и флогопит.

Мусковит – бесцветная прозрачная с розоватый оттенком слюда.

Флогопит имеет тёмный цвет с различного рода оттенком (янтарный, золотистый). По диэлектрическим свойствам мусковит является одним из лучших, превосходит в этом только флогопит. Мусковит допускает рабочую температуру до 500...600°С, а флогопит – 800...900°С.

Электрические свойства слюды вдоль и поперёк различны. Мусковит, когда электрическое поле действует перпендикулярно слоям, имеет следующие электрические свойства: $\varepsilon = 6...8$, $\rho_v = 1015 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $\text{tg}\delta = 0,0001...0,0005$, $E_{np} = 180...200 \text{ кВ/мм}$. Параметры флогопита: $\varepsilon = 6...7$, $\rho_v = 1013 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $\text{tg}\delta = 0,005$, $E_{np} = 90...100 \text{ кВ/мм}$.

Миканит – листовый или рулонный материал, полученный путём склеивания отдельных листов щепаной слюды. В качестве клеящего вещества применяются лаки. Миканиты в зависимости от назначения выпускаются коллекторные, прокладочные, микаленты и др. Из листов коллекторного миканита штамповкой получают изоляционные прокладки, применяемые для изоляции друг от друга медных пластин в коллекторных электрических машинах. А из прокладочного миканита изготавливают различного рода электроизоляционные прокладки, применяемые в электрических машинах и аппаратах.

Микафоль – рулонный или листовый материал, состоящий из одного или нескольких слоёв щипанной слюды (мусковит или флогопит), наклеенный на плотную телефонную бумагу толщиной 0,05 мм. В качестве связующего материала применяется глифталевые или масляно-глифталевые лаки. Из микафолия изготавливают (горячим прессованием) трубки для изоляции болтов и шпилек, гильзы для пазовой изоляции обмоток и другие фасонные изделия. Все виды микафолита относятся к классу нагревостойкости *B*. Электрические параметры: $\rho_v = 1012...1014 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $E_{np} = 13...20 \text{ кВ/мм}$.

Микалента – рулонный материал и представляет собой гибкий электроизоляционный материал толщиной 0,08...0,17 мм, состоящий из щипанной слюды, склеенный при помощи лака с микалентной бумагой, покрывающей слюду с обеих сторон. В микаленте содержится 40...60% слюды, 20...25% бумага, 12...20% клеящего вещества, а остальное – летучие вещества. Для сохранения гибкости микаленту поставляют и хранят в герметически закрытой таре. Микалента применяется в генераторах и электродвигателях высокого напряжения. Микалента имеет следующие характеристики: $\rho_v = 1012...1014 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $E_{np} = 10...12 \text{ кВ/мм}$.

1.2.2 Газообразные диэлектрики

Из газообразных диэлектриков наибольшее применение в электротехнических устройствах нашли воздух и водород.

Воздух – представляет собой смесь кислорода и азота (21% –кислород, 78% – азот). Диэлектрическая проницаемость воздуха вследствие его малой плотности невелика. Воздух обладает малой теплопроводностью. Запыление и повышение его температуры снижают электрическую прочность, а увеличение влажности наоборот увеличивает его электрическую прочность. Это объясняется тем, что молекулы воды притягивают свободные электроны, уменьшая их число в воздухе. Воздух является естественной изоляцией в качестве диэлектрика и поэтому его роль особенно важна в электроэнергетике. Для повышения электроизоляционных свойств воздуха необходимо поддерживать зоны, где находится электрооборудование, в чистом состоянии.

Водород. Он используется только для сигнальных целей, как например, электроизолирующая и охлаждающая среда крупных генераторов. Водород получают разложением воды электрическим способом. Он в 16 раз легче воздуха, а коэффициент теплопроводности больше в 7 раз.

При использовании водорода охлаждение электрических машин значительно улучшается. При замене воздуха водородом существенно снижаются потери мощности на трение ротора машин о газ и на вентиляцию, т.к. эти потери приблизительно пропорциональны плотности газа. Наконец, в атмосфере водорода улучшается работа щёток. Поэтому водородное охлаждение повышает мощность машин и КПД.

1.2.3 Жидкие диэлектрики

Жидкие диэлектрики по происхождению делятся на *минеральные* (нефтяные) масла и *синтетические* (совол, совтол и др.) жидкости.

Из жидких диэлектриков наибольшее применение имеет минеральные масла, особенно трансформаторное масло.

Трансформаторное масло. Трансформаторное масло получают путём перегонки нефти. При нагревании нефти (150-160°C) от неё отгоняются лёгкие бензиновые фракции, затем при температуре 160-300°C отгоняют более тяжелые фракции. После отгонки этих фракций остаётся густая жидкость, называется мазутом. Эта фракция нефти подвергается дальнейшей перегонки при температуре выше 300°C, в результате чего получают жидкий продукт – соляровое масло. Из него, путём дополнительной обработки, получают изоляционные масла: *трансформаторное, кабельное и конденсаторное.*

В трансформаторах высокого напряжения с помощью масла осуществляется изоляция частей трансформатора, находящихся под различным электрическим потенциалом. С помощью масла производится также отвод тепла от нагретых частей трансформатора к стенкам его корпуса.

В масляных высоковольтных выключателях масло играет роль не только жидкой изоляции, но и дугогасящей среды.

Кабельное масло предназначено для пропитки и заливки кабелей. Оно имеет повышенную вязкость. Путём добавления в масло канифоли получают масляно-канифольный, которым пропитывают бумажную изоляцию жил кабеля.

Трансформаторное масло имеет следующие технические характеристики. Температура застывания не выше 45°C, а температура вспышки паров масла в смеси с воздухом – не ниже плюс 135°C.

У сухого масла пробивное напряжение $E_{пр}$ порядка 40 кВ/мм (у влажного снижается до 20 кВ/мм). $tg\delta$ у сухого и чистого трансформаторного масла порядка 0,005 (с увеличением температуры до 80 °C $tg\delta$ увеличивается до 0,008). Удельное сопротивление свежего масла 1013 Ом·см, в процессе эксплуатации это сопротивление уменьшается. Диэлектрическая проницаемость масла $\varepsilon = 2,2-2,4$.

Трансформаторное масло в процессе работы, будучи нагретым и соприкасаясь с кислородом воздуха и металлическими частями, стареет. В процессе старения у масла ухудшаются диэлектрические и физико-химические свойства: повышается его вязкость, кислотность, зольность, в нём появляются жидкие и твёрдые продукты старения. В результате увеличивается ток проводимости и уменьшается электрическая прочность. Кислоты и продукты старения разрушают хлопчатобумажную изоляцию. Твёрдые продукты старения – смолистые вещества оседают на поверхности обмоток, затрудняя от них отвод тепла.

Для оценки качества масла проводят периодические испытания: испытания на электрическую прочность, сокращённый и полный анализ.

Масло, не удовлетворяющее нормативным требованиям в большинстве случаев может быть исправлено применением метода механической очистки. К этим методам относятся: отстой масла, центрифугирование, фильтрование, сушка под вакуумом.

Сильно окислённые масла, нуждающиеся в глубокой очистке, подвергаются регенерации.

Совол. Совол применяется для пропитки бумажных конденсаторов. Замена соволом нефтяного масла в производстве силовых бумажных конденсаторов позволяет снизить объём конденсатора при равной реактивной мощности в 2 раза. Это даст большой экономический выигрыш, хотя совол дороже нефтяного масла.

Конденсаторная бумага, пропитанная соволом, обладает большой электрической прочностью, чем бумага, пропитанная трансформаторным маслом (диэлектрическая проницаемость у масла $\varepsilon = 2,2$, а у совола $\varepsilon = 5,5$). Совол имеет преимущества и недостатки перед трансформаторным маслом.

Важным преимуществом совола перед маслом является то, что совол не горюч и при своём термическом распаде он не выделяет воспламеняющихся или опасных по взрыву газовых смесей. Недостатком совола является: имеет очень большую вязкость при температуре 20 °C и сравнительно высокую температуру застывания (плюс 5... минус 8°C); в выключателях при разрыве электрической дуги выделяется очень много сажи.

Для применения в трансформаторах, вводах высокого напряжения и масляных выключателях совол не пригоден.

Совтол. Совтол представляет собой смесь совола и трихлорбензолом. Совтолы по вязкости, температуре замерзания и диэлектрическим свойствам равноценны изоляционным маслам, но не воспламеняются и обладают значительно большей термической стабильностью (т.е. не разлагаются под действием температуры), чем нефтяные изоляционные масла.

Совтол предназначен для применения в трансформаторах и для пропитки бумажных конденсаторов. Однако диэлектрические свойства совтолов несколько ниже, чем совола. Так, электрическая прочность совтолов меньше электрической прочности соволов на 10-15%.

Синтетические диэлектрики значительно дороже и менее доступны, чем трансформаторное масло. Они могут конкурировать с последним только при применении их в специальных конструкциях трансформаторов с уменьшенным объемом.

Трансформаторы с совтоловым заполнением, как не представляющие пожарной опасности, не требуют специальных помещений и противопожарных устройств, а это, естественно, снижает стоимость всего сооружения.

Под действием электрической дуги совтол также разлагаясь, выделяет большое количество сажи. Поэтому он не может применяться в выключателях высокого напряжения.

Вопросы для самоконтроля

1. Объяснить механические свойства диэлектриков.
2. Нагревостойкость изоляции диэлектриков.
3. Классы нагревостойкости изоляции.
4. Гигроскопичность диэлектриков.
5. Краткие сведения о твердых диэлектриках.
6. Характеристики жидких диэлектриках.
7. Свойства трансформаторного масла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимофеев, И.А.* Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. *Серебряков, А.С.* Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. *Бородулин, В.Н.* Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.
4. *Герасимов, В.Г.* Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.
5. *Шустов, М.А.* Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов /М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.

Лекция 6

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

1.1 Физические процессы в магнитных материалах

Как известно, атом любого вещества состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращается электрон. Электрон, вращаясь вокруг ядра, подобен электрическому току, а всякий ток создает вокруг себя магнитное поле, которое обладает орбитальным магнитным моментом.

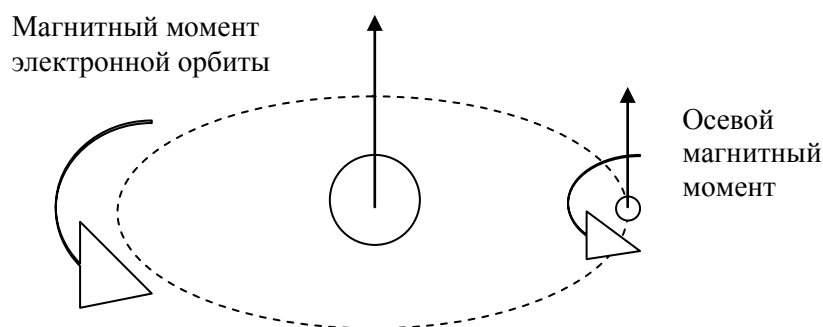


Рисунок 6.1– Магнитный момент атома

Магнитный момент является векторной величиной и направлен от южного полюса к северному.

Помимо движения вокруг ядра по орбите электрон вращается ещё вокруг собственной оси. Такое вращение приводит также к образованию магнитного момента и носит название спинового магнитного момента.

Атомы различных веществ имеют разное количество электронов, равное порядковому номеру в периодической системе Менделеева. Таким образом, атом в целом представляет сложную магнитную систему, каждый вращающийся электрон обладает как орбитальными, так и спиновыми магнитными моментами. Магнитный момент атома будет суммой этих моментов, причем эта сумма будет не арифметической, а более сложной. Тогда атом можно представить так, что он является элементарным магнитиком, т.е. источником магнитного поля, а вещество – состоящее из элементарных магнитиков.

Так обстоит дело в случае изолированного атома. В случае же твердого тела, представляющего собой коллектив огромного количества атомов, результирующий магнитный момент каждого из них определяется взаимодействием соседних атомов. В результате магнитные свойства вещества обусловлены не орбитальными, а спиновыми магнитными моментами, именно они при определенных условиях устанавливаются в веществе так, что возникают магнитные свойства (спиновый магнитный момент во много раз больше, чем орбитальный).

Если основные магнитные моменты в веществе ориентированы в одну сторону и суммарный магнитный момент не равен нулю, то такие вещества называются магнитными.

Если в отсутствии магнитного поля спиновые магнитные моменты вещества ориентировано по всем направлениям беспорядочно, то результирующий магнитный момент будет равен нулю. Такие вещества называются намагниченными.

1.2 Магнитные свойства вещества под действием внешнего магнитного поля

По отношению к действию внешнего магнитного поля все материалы делятся на три вида: *диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные.*

При внесении *диамагнитных* материалов во внешнее магнитное поле, каждый электрон атома материала изменяет характер своего движения таким образом, что создает дополнительный магнитный момент, направленный против внешнего поля. В результате ослабляется внешнее магнитное поле. После снятия внешнего магнитного поля индуцированный магнитный момент диамагнетика, ослабляющее внешнее магнитное поле, исчезает.

Диамагнитными являются все инертные газы, водород, большинство органических материалов, некоторые металлы, например, Zn, Ag, Be, Pb, и полупроводники, например Se, Si, Ge, В.

Парамагнитные материалы отличаются тем, что при отсутствии внешнего магнитного поля они проявляют себя как не магнитные материалы, т.е. векторная сумма магнитных моментов всех молекул равна нулю. Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов ориентируются в направлении внешнего магнитного поля и усиливают его. Однако это усиление зависит от температуры. Это объясняется тем, что тепловое движение атомов препятствуют этой ориентации. Следовательно, ориентация магнитных моментов будет тем меньше, чем выше температура и слабее внешнее магнитное поле.

К *парамагнетикам* относятся некоторые металлы, например Al, Cr, Na, Mg, W, затем кислород и некоторые оксиды, например, CuO и CoO и другие материалы.

Ферромагнетики – это материалы, у которых собственное магнитное поле может в сотни и в тысячи раз превышать внешнее магнитное поле. Явление ферромагнетизма объясняется следующим образом. Любой ферромагнетик состоит из очень малых областей с линейными размерами порядка $10^{-2} \dots 10^{-5}$ см эти области получили название доменов. В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных доменов расположены в пространстве беспорядочно и хаотически, так что результирующая намагниченность равна нулю.

При помещении ферромагнетика во внешнее магнитное поле происходит ориентация магнитных моментов доменов в направлении поля, т.е. внешнее магнитное поле производит ориентацию не отдельных молекул, а целых областей. В достаточно сильных полях все домены ориентированы вдоль поля – наступает *момент магнитного насыщения*. При выключении внешнего поля тепловое движение стремится дезориентировать *домены*. Однако внутреннее трение между ними мешает полной *дезориентации*. Этим объясняется остаточная намагниченность ферромагнетизма.

К ферромагнитным материалам относятся такие материалы, как Fe, Ni, Co и многие их сплавы, некоторые соединения ферромагнитных материалов с редкоземельными элементами. Кроме того, являются ферромагнитными некоторые сплавы Mn с Cu и Al и др.

Намагничивание парамагнитных, диамагнитных и ферромагнитных материалов лучше всего показать на примере, когда эти материалы помещаются в соленоид и по обмотке соленоида протекает постоянный ток. Поскольку соленоид при протекании тока ведет себя подобно магниту, то помещенные материалы в соленоид будут пронизываться магнитным полем.

Изобразим эту зависимость графически (рис. 6.2). На оси абсцисс отложим возрастающее значение ампервитков или пропорциональный ампер виткам напряженности намагничивающего поля, а на оси ординат – величину индукции в зависимости от ампервитков, то получим для различных материалов ряд кривых.

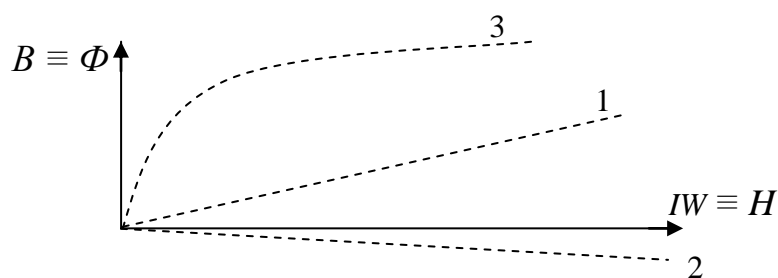


Рисунок 6.2–Зависимость индукции от напряженности магнитного поля для различных материалов где 1, 2, 3 – соответственно парамагнитные, диамагнитные и ферромагнитные материалы

У парамагнитных материалов процесс намагничивания прост. По мере возрастания силы магнитного поля (это осуществляется увеличением тока в соленоиде) атомные магнетики располагаются все более параллельно полю. Этот процесс происходит постепенно, и намагниченность материала также растет постепенно. Для этих материалов зависимость B от I линейна – можно сказать, что индукция пропорциональна внешнему намагничивающему полю.

У диамагнитных материалов процесс протекает примерно так же, но только собственное магнитное поле, которое создается атомными элементарными магнетиками, направлено против внешнего поля. Поэтому магнитное поле внутри диамагнитных материалов ослабляется. С увеличением внешнего магнитного поля намагниченность так же растет равномерно.

Если в соленоид установить ферромагнитный материал, то картинка резко изменится. Сначала при увеличении силы тока в сердечнике будет ориентироваться все больше и большее количество элементарных магнетиков, и магнитная индукция будет расти почти пропорционально росту напряженности намагничивающего поля. Но число элементарных магнетиков ограничено. Чем больше магнетиков ориентировано, тем меньше остается неориентированных и тем медленнее с усилением внешнего поля растет число ориентированных магнетиков. Наконец, наступит момент, когда почти все элементарные магнетики будут ориентированы по внешнему полю, тогда ферромагнитный материал перестанет добавлять свое поле к внешнему полю, и дальнейшее увеличение потока будет происходить лишь за счет увеличения магнитного потока самого соленоида, т.е. будет очень незначительным. Когда достигнуто это состояние, то наступает насыщение ферромагнитного материала.

Вопросы для самоконтроля

1. Понятие орбитального и спинового магнитного момента.
2. Объяснить свойства ферромагнитных материалов.
3. Парамагнитные материалы и их свойства.
4. Диамагнитные материалы. Область применения.
5. Объяснить зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев, И.А. Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.
4. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.
5. Шустов, М.А. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.

Лекция 7

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Основные характеристики магнитных материалов

Магнитные материалы в зависимости от формы петли гистерезиса (эта кривая изменения индукции при циклическом изменении силы магнитного поля от 0 до +H, от +H до -H и снова до +H) делятся на магнитомягкие и магнитотвёрдые материалы. На рис. 7.1 приведены разные типы *петель гистерезиса*.

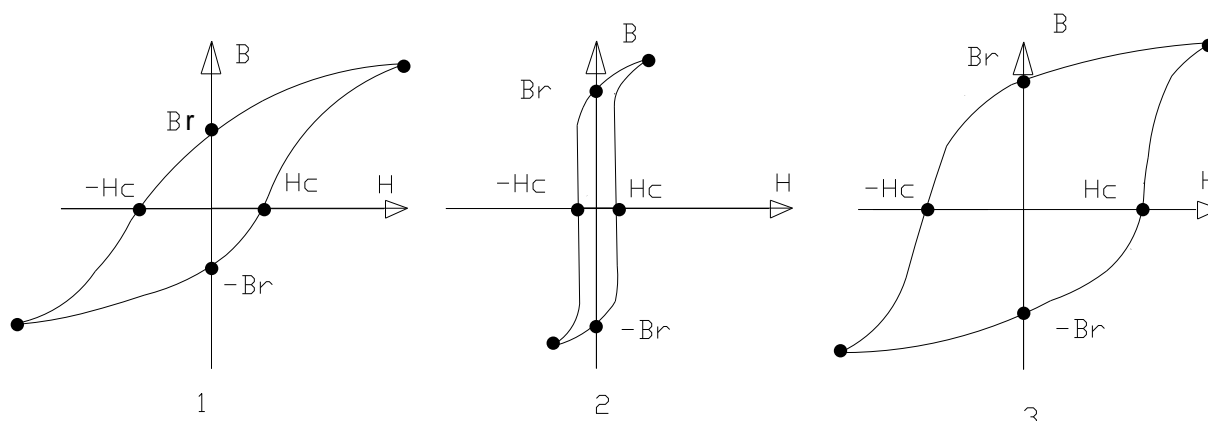


Рисунок 7.1–Разные типы петель гистерезиса

где 1 –магнитомягкий материал (электротехническая сталь);
2–магнитомягкий материал (пермаллой); 3 –магнитотвёрдый материал

Магнитомягкие материалы имеют малое значение коэрцитивной силы, а *магнитотвёрдые* материалы обладают большей коэрцитивной силой. Магнитомягкие материалы, обладая небольшой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезисе, используются в качестве сердечников трансформаторов, электродвигателей и в других случаях. Магнитотвёрдые материалы служат для изготовления постоянных магнитов. Большинство современных электротехнических аппаратов работают на переменных токах. Поэтому процесс перемагничивания магнитных материалов в переменном магнитном поле сопровождается превращением определённой части энергии магнитного поля в теплоту, что внешне проявляется в нагреве магнитного материала. С точки зрения механизма возникновения потерь различаются два вида магнитных потерь: потери на гистерезис и потери на вихревые токи. Потери на гистерезис связаны с явлением магнитного гистерезиса и пропорциональны площади петли гистерезиса. Так как гистерезисный цикл и связанные с ним потери повторяются в течение каждого периода, потери на гистерезис пропорциональны частоте переменного магнитного поля и определяются выражением:

$$p_2 = \sigma_2 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{B_m}{10^4} \right)^2 \quad (7.1)$$

где B_m – максимальная индукция достигаемая в течение цикла; $\sigma = 2,4$ – для электротехнической стали толщиной 0,35 мм.

Потери на вихревые токи вызываются электротехническими токами, которые магнитный поток индуцирует в магнитном материале. Они пропорциональны квадрату частоты магнитного поля, и поэтому при высоких частотах являются ограничивающим фактором применения магнитных материалов. При высоких частотах используются ферромагнитные материалы(ферриты), которые имеют порошкообразную структуру, в которых частицы самого магнитного материала покрыты соответствующим электроизоляционным материалом. Тем

самым достигается повышение удельного электрического сопротивления магнитных материалов и, соответственно, уменьшения вихревых токов при высоких частотах магнитного поля.

$$P_e = \sigma_m \cdot \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B_m}{10^4} \right)^2 \quad (7.2)$$

При оценке качества материала, как правило, разделение потерь на гистерезис и вихревые токи не делают, а оценивают суммарными потерями, так называемыми потерями в стали или удельными потерями Вт/кг при индукции 1,0Тл. Эти показатели для магнитных материалов, используемые в электротехнических устройствах, нормированы. Магнитные свойства материалов оценивают физическими величинами, называемыми магнитными характеристиками.

Магнитная проницаемость. Различают *магнитную* и *абсолютную магнитную* проницаемости материала, которые между собой связаны соотношением:

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu, \quad (\text{Гн/м}) \quad (7.3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) μ – относительная магнитная проницаемость (безразмерная величина).

Для описания свойств магнитных материалов применяют относительную магнитную проницаемость μ (чаще называемую магнитная проницаемость), а для практических расчётов используют абсолютную магнитную проницаемость μ_a , вычисляемую по уравнению

$$\mu_a = \frac{B}{H}, \quad (\text{Гн/м}) \quad (7.4)$$

где H – напряжённость намагничивающего (внешнего) магнитного поля, А/м; B – магнитная индукция в магнитном материале.

Большая величина μ показывает, что материал легко намагничивается в слабых и сильных магнитных полях. Магнитная проницаемость у большинства материалов зависит от напряжённости намагничивающего магнитного поля. Для характеристики магнитных свойств широко используется безразмерная величина, называемая магнитной восприимчивостью X .

$$\mu = 1 + X \quad (7.5)$$

Температурный коэффициент магнитной проницаемости. Магнитные свойства вещества зависят от температуры $\mu = \mu(T)$. Для описания характера изменения магнитных свойств с температурой используют температурный коэффициент магнитной проницаемости

$$TK_\mu = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1}, \quad \frac{1}{град} \quad (7.6)$$

Зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков от температуры T описывается законом Кюри:

$$X = \frac{C}{T} \quad (7.7)$$

где C – постоянная Кюри.

1.2 Краткие сведения о конкретных магнитных материалах

Электротехническая сталь является основным магнитным материалом для электротехнических устройств. Введением в состав этой стали кремния достигается снижение потерь на вихревые токи и гистерезис, а также увеличение магнитной проницаемости. Сталь электротехническую подразделяют и маркируют:

а) по структурному состоянию и виду прокатки на классы (первая цифра марки): 1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная, 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой;

б) по содержанию кремнию (вторая цифра марки): 0 – с содержанием кремния до 0,4% включительно; 1 – от 0,4 до 0,8% вкл.; 4 – 2,8 до 3,8% вкл.; 5 – от 3,8 до 4,8% вкл.;

е) по основной нормируемой характеристике (третья цифра в марке); 0– удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц (P 1,7/50); 1– при 1,5 Тл и 50 Гц (P 1,5/50); 2– при 1,0 Тл и 400 Гц (P 1,0/400); 6– магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м (B 0,4); 7– магнитная индукция в средних магнитных полях при 10 А/м (B 10).

Электротехническая сталь маркируется четырьмя цифра. Первые три цифры означают –тип стали; четвертая – порядковый номер типа стали. Сталь выпускается в виде рулонов, листов и резанной ленты. Она может быть без электроизоляционного покрытия или иметь его. Толщина листов стали 0,1-1,0 мм. Сталь различных классов предназначается для изготовления магнитных цепей аппаратов, трансформаторов, приборов, электрических машин. Текстурированная сталь используется для сердечников трансформаторов. Применение этой стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20-25%.

В табл. 7.1 приведены предельные значение удельных потерь и индукции для стали класса 2, а в табл. 7.2– для стали класса 3.

Таблица 7.1 – Предельное значение удельных потерь и магнитной индукции электротехнической стали класса 2

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряжённости магнитного поля, А/м, не менее				
		P1,0/50	P1,5/50	1000	2500	5000	10000	30000
2013	0,65	3,10	7,0	1,53	1,64	1,74	1,85	2,05
	0,5	2,50	5,6	1,54	1,65	1,75	1,85	2,05
2112	0,65	3,50	8,0	1,46	1,58	1,67	1,77	2,02
	0,5	2,60	6,0	1,46	1,60	1,68	1,77	2,02
2212	0,65	2,60	6,3	1,42	1,58	1,67	1,77	2,00
	0,5	2,20	5,0	1,42	1,60	1,68	1,77	2,00
2312	0,65	2,40	5,6	1,38	1,54	1,68	1,72	1,96
	0,5	1,75	4,0	1,40	1,56	1,66	1,74	1,96
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95

Таблица 7.1 – Предельное значение удельных потерь и магнитной индукции электротехнической стали класса 3

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция Тл, при напряжённости магнитного поля, А/м, не более		
		P1,0/50	P1,5/50	P1,7/50	100	250	2500
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	-	-	1,75
3414	0,35	0,80	1,75	2,50	-	-	1,75
	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
3415	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,46	1,03	1,5	1,61	1,71	1,90

Пермаллои. Пермаллоями называют железно-никелевые сплавы, обладающие большой начальной магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Пермаллои подразделяют на: высоко- и низконикелевые. Содержат до 70-83% никеля, а низконикелевые до 40-50%. Магнитная проницаемость высоконикелевых пермаллоев в несколько раз выше, чем у низконикелевых, и намного превосходят проницаемость электротехнических сталей. Удельное сопротивление высоконикелевых пермаллоев почти в три раза меньше, чем низконикелевых, поэтому при повышенных частотах предпочтительно использовать низконикелевые пермаллои.

Магнитная проницаемость пермаллоев сильно снижается с увеличением частоты. Маркировка 80НХС, остальные хром и кремний. Сплавы 45Н и 50Н применяют для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей и деталей магнитных цепей. Из сплава 50НХС выполняют сердечники импульсных трансформаторов. Сплавы 79НМ, 80НХС, 76НХД используют для изготовления сердечников малогабаритных трансформаторов. В марках пермаллоев буква Н означает никель, К– кобальт, М– марганец, Х– хром, С– кремний, Д– медь.

Ферриты. Технологический процесс производства ферритовых изделий сводится к тому, что предварительно получают ферритовый порошок, состоящий из тонко измельченных оксидов соответствующих материалов. В него добавляют пластификатор и из полученной массы прессуют под большим давлением изделия требуемой формы. Изделия подвергают обжигу при температуре 1100-1400 °С. При этом происходит спекание и образование твердых растворов ферритов. Ферриты – твердые и хрупкие материалы, не позволяющие производить обработку резанием и допускающие только шлифовку и полировку.

Электропроводность ферритов незначительная и имеет электронную проводимость. Большое удельное сопротивление, превышающее ρ железа в 10^6 - 10^{11} раз, относительно небольшие потери энергии в области повышенных и высоких частот с высокими магнитными свойствами обеспечивают ферритам самое широкое применение при повышенных и высоких частотах.

Магнитодиэлектрики. Они представляют собой одну из разновидностей магнитных материалов, предназначенных для использования при повышенных и высоких частотах, т.к. они характеризуются большим удельным электрическим сопротивлением, а, следовательно, и малым тангенсом угла магнитных потерь. Магнитодиэлектрики получают способом прессовки порошкообразного ферромагнетика с изолирующей зерна друг от друга органической или неорганической связкой. В качестве основы применяют карбональное железо и др. Изолирующей связкой служат различные смолы, полистирол и т.п. От основы требуется наличие высоких магнитных свойств, от связки – способность образовывать между зернами сплошную, без разрыва электроизоляционную плёнку. Магнитная проницаемость у магнитодиэлектриков меньше, чем у ферромагнетиков, но обладают малыми потерями, поглощательным температурным коэффициентом магнитной проницаемости. В связи с широким выпуском ферритов различных марок, обладающих преимуществами по сравнению с магнитодиэлектриками, последние сохранили общественные области применения.

Вопросы для самоконтроля

1. Петля гистерезиса у магнитомягких материалов.
2. Петля гистерезиса у магнитотвердых материалов.
3. Потери на гистерезис у магнитомягких и магнитотвердых материалов.
4. Магнитная проницаемость материалов.
5. Основные характеристики электротехнической стали.
6. Характеристики и область применения пермаллои.
7. Ферриты. Характеристики и область применения.
8. Магнитодиэлектрики. Область применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев, И.А. Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.

4. *Герасимов, В.Г.* Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.

5. *Шустов, М.А.* Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов /М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.

Лекция 8

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1 Свойства проводниковых материалов

В качестве основных проводниковых материалов применяют:

- материалы высокой проводимости, используемые для изготовления всевозможных обмоток электрических машин, аппаратов и приборов;
- сплавы высокого сопротивления, используемые для изготовления всевозможных сопротивлений и нагревательных приборов, термопара и др.

Проводниковые материалы характеризуются *электрическими*, *тепловыми* и *механическими* свойствами.

К *электрическим* свойствам относятся удельное электрическое сопротивление, к *тепловым* – температурный коэффициент теплового линейного расширения и коэффициент теплопроводности, а к *механическим* свойствам относятся предел прочности при растяжении и относительное удлинение.

1.1.1 Удельное электрическое сопротивление

Для проводниковых материалов удельное сопротивление выражают в Ом·мм²/м, т.е. за величину удельного сопротивления в [Ом] проволоки из данного материала длиной 1 м, сечением 1 мм² при 20 °С и определяют по выражению

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (8.1)$$

где R – электрическое сопротивление материала, Ом; l – длина проводника, м; S – сечение проводника, мм².

Общее электрическое сопротивление проводника R находят непосредственным измерением, а по формуле (8.1) вычисляют величину удельного сопротивления проводника.

Удельное электрическое сопротивление есть основная электрическая характеристика проводникового материала, т.к. она позволяет оценить сопротивление, оказываемое материалом при протекании через него электрического тока. Чем меньше ρ , тем лучше проводниковый материал, т.к. он в большей мере способен проводить электрический ток. Так, у меди $\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м, у алюминия – 0,028 Ом·мм²/м. Эти значения удельного сопротивления показывают, что медь лучше проводит ток по сравнению с алюминием.

Удельное сопротивление проводниковых материалов увеличивается с повышением температуры. Причиной температурной зависимости удельного сопротивления является уменьшение подвижности электронов при нагреве. Поэтому при увеличении температуры проводника, ток в нем уменьшается, хотя напряжение остается постоянной. В области обычных эксплуатационных температур зависимость удельного сопротивления от температуры определяется выражением

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (8.2)$$

где ρ_t – удельное сопротивление при температуре t ; ρ_0 – удельное сопротивление при начальной температуре t_0 ; α – температурный коэффициент удельного сопротивления данного проводникового материала при начальной температуре t_0 .

Величина α показывает, насколько увеличивается сопротивление проводника при нагревании его на 1°С. Так, при повышении температуры проводника на 100°С выше 20 °С его сопротивление возрастает примерно на 40%.

Свойство проводника проводить электрический ток часто оценивается еще величиной удельной проводимости γ . Удельная проводимость есть величина, обратная удельному сопротивлению:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \frac{м}{Ом \cdot мм^2} \quad (8.3)$$

Удельная проводимость указывает, в какой мере тот или иной материал проводит электрический ток. Так у серебра $\gamma = 65,8$ м/Ом·мм², у меди $\gamma = 57$ м/Ом·мм², т.е. серебро лучше проводит электрический ток, так как его удельная проводимость больше, чем у меди.

1.1.2 Температурный коэффициент теплового, линейного расширения

Температурный коэффициент линейного расширения α показывает изменение первоначальной длины l_0 до длины l при изменении температуры её от t_0 до t .

Чтобы вычислить α , величину изменения длины образца материала ($l-l_0$) делят на первоначальную его длину l_0 и на разность температур ($t-t_0$). Следовательно, α представляет величину изменения линейных размеров материала, отнесенную к единице первоначальной длины материала при изменении его температуры на 1°С, т.е.

$$\alpha = \frac{l-l_0}{(t-t_0) \cdot l_0}, \frac{1}{^\circ C} \quad (8.4)$$

Величина α у разных материалов различна так, у алюминия $\alpha = 24 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, у алюминия $\alpha = 17 \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

Зная величину α и первоначальную длину l_0 можно подсчитать длину проводникового материала при любой температуре t .

Те металлы, которые имеют малый коэффициент α , мало изменяют при нагреве размеры, изготовленных из них деталей. Такие материалы могут обеспечить необходимое постоянство размеров машин и аппаратов при нагревании.

$$l = l_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (8.5)$$

Металлы с большим α пригодны там, где необходимо при достижении определенной температуры осуществить автоматически соединение или разрыв электрических контактов. Это свойство металлов часто используется в электрических регуляторах температуры.

1.1.3 Коэффициент теплопроводности

Он оценивает теплопроводность материала, т.е. свойство материала проводить тепло от более нагретых его частей к менее нагретым. Коэффициент теплопроводности определяется количеством тепла (кал), проходящим за 1 сек через материал в виде, пластины площадью 1 см² и толщиной 1см при разности температур 1°С и вычисляется по выражению

$$\lambda = \frac{Q \cdot h}{S(t-t_0) \cdot \tau}, \frac{кал}{см \cdot град \cdot сек} \quad (8.6)$$

где Q – количества тепла; S – площадь поперечного сечения; h – толщина материала; τ – время; $t-t_0$ – разность температур.

В системе СИ λ имеет размерность Вт/м·°С. 1 кал/см·°С·сек = 418,68 Вт/м·°С.

1.1.4 Термоэлектродвижущая сила

Когда два разнородных металла или сплава соприкасаются друг с другом, между ними возникает разность потенциалов, которая получила наименование *контактной*. Одной из причин такой контактной разности потенциалов является различное число свободных электронов у металлов и неодинаковая величина работы выхода электронов из металлов или сплавов.

Если имеется замкнутая цепь из двух металлов (рис.8.1) и температура этих контактов изменяется, то в этом случае между ними возникает термо-ЭДС, которая пропорциональна разности этих температур.

Это обстоятельство имеет очень большое практическое значение, т.к. с помощью проволок из двух различных металлов (термопара), можно измерить температуру. Если вместо милливольтметра установить контактный терморегулятор, то с помощью термопар можно регулировать и поддерживать в том или ином устройстве температуру заданной величины, что широко используется на практике.

Для изготовления термопар используют проволоки из металлов, имеющих возможно большую термо-ЭДС. В настоящее время для этих целей обычно применяют константан, алюмель, хромель и др. металлы. Так например термопары ХК (хромель-копель) могут работать при измерении температуры до 600 °С; ХА – хромель-алюмель – до температуры до 1000 °С.

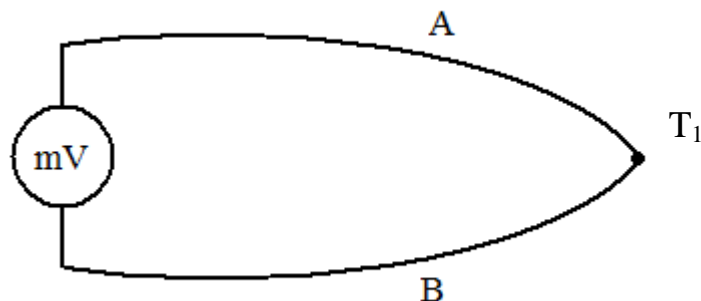


Рисунок 8.1–Схема устройства термопары

1.1.5 Предел прочности при растяжении

Пределом прочности при растяжении (G_p) называется отношение величины нагрузки P_p , при которой происходит разрушение металла образца при растяжении, к площади поперечного сечения S .

$$G_p = \frac{P_p}{S} \quad (8.7)$$

Под действием нагрузки на образец наступает такой момент, когда образец «течет» без заметного увеличения нагрузки.

1.1.6 Относительное удлинение

Относительным удлинением при разрыве называется отношение приращения длины образца при разрыве к исходной длине образца l_0 .

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (8.5)$$

где l_0 – первоначальная длина образца; l – длина образца после разрыва.

Приведенные механические характеристики металлов имеют важное значение для проводов, главным образом, для проводов воздушных линий.

1.2 Краткие сведения о конкретных проводниковых материалах

1.2.1 Проводниковые материалы с малым сопротивлением

Медь. Медь является наиболее широко применяемым проводниковым материалом в электротехнических изделиях. Преимуществами меди, обеспечивающими ей широкое применение в качестве проводникового материала, является:

- малое удельное сопротивление, только немного (примерно на 10%) уступающее серебру;
- достаточно высокая механическая прочность;
- удовлетворительная стойкость по отношению к коррозии (медь окисляется на воздухе, даже в условиях высокой влажности, чем, например, железо; интенсивное окисление происходит только при повышенных температурах;
- хорошая обрабатываемость – медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра;
- относительная легкость пайки и сварки.

Медь получают путем переработки сульфидных руд. После ряда плавок и обжигов медь, предназначенная для электротехнических изделий, обязательно подвергается очистке.

Для электротехнических целей применяют медь двух видов – твердую медь (МТ) и мягкую медь (ММ).

Твердая медь МТ применяется главным образом для голых проводов связи, линий электропередач, коллекторных пластин электрических машин, т.е. там, где требуется высокая механическая прочность.

Мягкая медь ММ применяется для изготовления токопроводящих жил кабелей, проводов и шнуров.

Механические и электрические свойства меди марки ММ следующие: плотность – $d = 8,9$ г/см³; предел прочности при растяжении – $G_p = 20...25$ кг/мм²; относительное удлинение – $\delta = 15...40\%$; удельное сопротивление $\rho = 0,0175...0,01754$ Ом·мм²/м, а у марки МТ – $d = 8,96$ г/см³; $G_p = 36...40$ кг/мм²; $\delta = 0,5...2,5\%$, $\rho = 0,0177...0,0180$ Ом·мм²/м.

Проводниковые сплавы на основе меди. Из сплавов на основе меди наибольшее применение в электротехнических устройствах бронза и латунь.

Бронза. Сплав меди с оловом, кремнием, алюминием, кадмием, бериллием, и другими специально вводимыми (легирующими) элементами.

Бронзы по сравнению с чистой медью обладают большей твердостью и механической прочностью, большей антикоррозионностью и стойкостью к истиранию, но электрическое сопротивление их больше, чем у меди.

Бронзы широко применяют для изготовления проводов с повышенной механической прочностью, а также щеткодержателей, пружин и контактных деталей для электрических аппаратов и приборов.

Наиболее пластичностью обладают алюминиевые бронзы. Бериллиевые бронзы отличаются очень высокой механической прочностью, сопротивлением к истиранию и окислению на воздухе. Кремниевые бронзы обладают хорошей электропроводностью.

Латунь. Сплав меди с цинком (Zn – 20...55%) При меньшем содержании цинка латунь будет мягче, пластичнее. Увеличение содержания цинка латунь становится твердой, механически более прочной.

Для повышения антикоррозионности в латунь вводят примеси других металлов (Al, Ni, Mn). Она применяется в виде проволоки, листов, лент, где требуется большая механическая прочность, но не требуется высокой электропроводности. В табл. 9.1 приведены основные характеристики бронзы и латуни.

Таблица 9.1 – Основные характеристики бронзы и латуни

Материал	Электропроводность в % по отношению к меди	Предел прочности при растяжении, кг/мм ²	Относительное удлинение, %
Бронза кадмиевая	95	31	50
Бронза бериллиевая	36	70-79	20
Бронза фосфористая	10-15	40	60
Латунь, Л-62	25	35-42	60-70

Алюминий. Он является важнейшим проводниковым материалом и занимает второе место после меди. Плотность прокатного алюминия составляет – 2,7 г/см³, литого – 2,6 г/см³. Коэффициент линейного расширения в 1,5 раза больше, чем у меди; предел прочности при растягивании $G_p = 6-12$ кг/мм², относительное удлинение $\delta = 40\%$.

Алюминий хорошо обрабатывается давлением как в холодном, так и в горячем состоянии; допускает механическую обработку резанием, обладает хорошим литейными свойствами. Он выпускается в виде листов, прутков, проволоки, шин, фольги.

Алюминий обладает по сравнению с медью пониженными свойствами – как механическими, так и электрическими. При одинаковом сечении и длине электрическое сопротивление алюминиевого провода больше, чем медного в 1,63 раза. Следовательно, чтобы получить алюминиевый провод такого же электрического сопротивления, как и медный, нужно взять его сечение в 1,63 раза больше, а диаметр должен быть в 1,63 раза больше диаметра медного

провода. Таким образом, если имеется ограничение по габаритам, то замена меди на алюминий затруднена.

Если сравнить по весу два отрезка проводов алюминия и меди, имеющие одинаковую длину, то алюминиевый провод приблизительно в два раза легче, чем медный.

Алюминиевая проволока выпускается двух марок: АТ – твердая и АМ – мягкая.

К недостаткам алюминия следует отнести сложность пайки (требует специального флюса) и трудность сварки по сравнению с железом.

При эксплуатации алюминиевых проводов необходимо соблюдать ряд условий, главным из которых является: исключить соединение с медью в контактах электрических аппаратах, т.к. алюминий в соприкосновении с медью дает большую контактную разность потенциалов, и за счет этого возникает электрохимические процессы, разрушающая алюминий.

1.2.2 Проводниковые материалы высокого сопротивления

Материалы с высоким удельным электрическим сопротивлением применяются для изготовления различного рода проволочных реостатов, резисторов, а так же нагревательных элементов. Исходя из названия этих материалов, они могут быть разделены на две основные группы: реостатные сплавы, жаростойкие материалы.

Реостатные сплавы должны обладать следующими основными свойствами:

- высоким удельным сопротивлением;
- малым температурным коэффициентом удельного сопротивления;
- малой термо-ЭДС в паре с медью;
- достаточной пластичностью и механической прочностью.

Жаростойкие сплавы должны обладать:

- высоким удельным сопротивлением;
- малым температурным коэффициентом удельного сопротивления;
- механической прочностью и химической стойкостью.

К реостатным сплавам относятся манганин, константан и др., а к жаростойким сплавам – нихром, фехраль и др.

Состав и свойства основных сплавов высокого сопротивления приведены в таблице 9.1.

Таблица 9.2 – Состав и свойства основных сплавов высокого сопротивления

Наименование, состав	Удельное сопротивление, Ом·мм ² /м	Температурный коэф. удельного сопротивления α , град ⁻¹	Термо-ЭДС, относительно меди, мкВ/град	Допустимая рабочая температура, °С	Применение
Манганин, Cu-86%; Mn-12%; Ni-2%.	0,42-0,48	$(5-30) \cdot 10^{-6}$	1-2	100-200	Для изготовления образцовых сопротивлений
Константан, Cu-60%; Ni-40%	0,4-0,52	$(5-25) \cdot 10^{-6}$	40-50	450-500	Для изготовления реостатов, электронагревателей, термопар
Нихром, Ni-80%; Cr-20%; Mn-1,5%.	1,1	$2 \cdot 10^{-4}$	0	1100	Для нагревательных элементов электроплиток и т.д.
Фехраль Cr-20%; Fe-80%.	1,4	$6,5 \cdot 10^{-5}$	0	1200	Нагревательные элементы для печных нагревательных устройств и промышленных печей

1.3 Обмоточные и установочные провода

Обмоточные провода выпускаются в зависимости от вида изоляции: а) эмалевой изоляции; б) волокнистой и пленочной изоляции; в) эмалево-волокнистой изоляции.

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией. Эмалевая изоляция имеет наименьшую толщину (0,003-0,065 мм) по сравнению с волокнистой и пленочной изоляцией обмоточных проводов. Это позволяет в том же объеме обмотки замотать большее число проводов и тем самым увеличить мощность электрической машины. Поэтому эмалированные провода являются наиболее перспективными среди обмоточных проводов. Эмалевая изоляция на проводе представляет собой гибкое лаковое покрытие, полученное в результате затвердевания слоя лака, нанесенного на провод. Нанесение лака на провод производят на эмалированных станках.

Основной сортament медных проводов с эмалевой изоляцией приведен в таблице 9.2.

Таблица 9.2– Основной сортament медных проводов с эмалевой изоляцией

Марка провода	Диаметр жилы без изоляции, мм	Характеристика провода	Толщина слоя изоляции (на одну сторону), мм	Области применения
ПЭВ-1	0,02 - 2,44	Провод, изолированный высокопрочной эмалью винилфлекс	0,004 - 0,025	Обмотки электрических машин, аппаратов, приборов, работающих при t не выше 105 °С
ПЭВ-2	0,05 - 2,44	То же, но с утолщенным слоем эмалевой изоляции	0,006-0,035	То же
ПЭВТЛ-1	0,02 - 1,56	Провод, изолированный высокопрочной эмалью повышенной нагревостойкостью	0,003-0,035	Обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при t до 120 °С
ПЭВТЛ-2	0,02 - 1,56	То же, но с утолщенной изоляцией	0,005 - 0,04	То же
ПЭТВ	0,06 - 2,44	Провод, изолированный высокопрочной полиэфирной эмалью повышенной нагревостойкости	0,005 - 0,04	Обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при t до 130 °С
ПНЭТ-ИМИД	0,1 - 2,44	Провод никелированный изолированный высокопрочнойнагревостойкой полиамидной эмалью	0,012 - 0,05	Обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при t до 220 °С
Алюминиевые обмоточные провода с эмалевой изоляцией				
ПЭВА	0,08-2,44	Провод, изолированный высокопрочной эмалью винилфлекс	0,01-0,06	Обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при t до 110 °С
ПЭТВА	0,14-2,44	Провод, изолированный высокопрочной полиэфирной эмалью повышенной нагревостойкости	0,02-0,07	обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при t до 130 °С
ПЭТА	0,08-2,44	Провод никелированный изолированный высокопрочнойнагревостойкой полиамидной эмалью	0,02-0,06	обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при t до 220 °С

Обмотки, выполненные проводами с эмалевой изоляцией, нуждаются в пропитке электроизоляционными лаками, как и обмотки из проводов с волокнистой изоляцией. Как правило, в тонком слое эмалевого изоляционного покрытия всегда имеется небольшое количество сквозных отверстий (точечные повреждения, вызванное несовершенством технологии эмалирования) и наличием заусенцев на проволоке. На длине провода 1 м может быть от 5 до 15 точечных повреждений.

Важнейшими характеристиками эмалевых проводов являются эластичность, стойкость к тепловому удару, термопластичность и механическая прочность при истирании.

Обмоточные провода с волокнистой и пленочной изоляцией. Обмоточные провода с волокнистой и пленочной изоляцией имеют значительно большую толщину изоляции (0,15 - 0,6 мм) по сравнению с эмалированными проводами. В качестве волокнистой изоляции применяются пряжа из хлопчатобумажных, шелковых, капроновых, асбестовых, лавсановых и стеклянных волокон. Некоторые медные и алюминиевые провода с волокнистой изоляцией приведены в таблице 9.3.

Таблица 9.3 –Некоторые медные и алюминиевые провода с волокнистой изоляцией

Марка провода	d провода без изоляции, мм	Характеристики провода
ПБ	1,0 - 5,2	Провод изолированный несколькими слоями кабельной бумаги
ПБД	0,18 - 5,2	Провод, изолированный двумя слоями обмотки из х/б пряжи
ПСД	0,31 - 5,2	Провод, изолированный двумя слоями обмотки из стекло волокна, пропитанный нагревостойким глифталевым лаком
ПСДК	0,31 - 5,2	То же, но пропитка более нагревостойкая кремне-органическим лаком
Алюминиевые обмоточные провода с волокнистой изоляцией		
АПБ	1,35 - 8,0	Изолированные несколькими слоями кабельной бумаги
АПБД	□сечение	Изолированные несколькими слоями х/б пряжи
АПСР	1,02 - 5,2	То же, что и у медного провода

Для изготовления обмоток трансформаторов с масляной изоляцией находят провода с изоляцией из бумажных лент, которые хорошо пропитываются минеральными маслами. Этим обеспечивается высокая электрическая прочность изоляции обмоток трансформаторов.

Наибольшей электрической прочностью обладает обмоточные провода с пленочной изоляцией из лавсана (ППЛБО). Изоляция отличается повышенной механической прочностью и нагревостойкостью до 120°C.

Вопросы для самоконтроля

1. Медь. Характеристики и область применения.
2. Алюминий. Характеристики и область применения.
3. Проводниковые материалы высокого сопротивления. Область применения.
4. Свойства сплавов высокого сопротивления.
5. Характеристики и область применения установочных проводов.
6. Характеристики и область применения обмоточных проводов.
7. Материалы высокой проводимости.
8. Материалы высокого сопротивления.
9. Удельное электрическое сопротивление проводников.
10. Удельная проводимость проводников.
11. Тепловой коэффициент теплового и линейного расширения.
12. Термоэлектродвижущая сила. Назначение термопар.
13. Механические характеристики проводниковых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев, И.А. Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.
4. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.
5. Шустов, М.А. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов /М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимофеев, И.А. Электротехнические материалы и изделия [Текст] : учеб.пособие для вузов / И.А. Тимофеев. – М.: Лань, 2011, – 272 с.
2. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение [Текст] : учеб.пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2012 – 140 с.
3. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюшин – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 280 с.
4. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов / В.Г. Герасимов. – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 442с.
5. Шустов, М.А. Электротехнический справочник [Текст] : учеб.пособие для вузов /М.А. Шустов. – М.: Издательство «Наука и Техника», 2013 – 592 с.
6. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам [Текст] : учеб.пособие / Ю.В Корицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – М.: Энергия, 2006. – 324 с.
7. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов [Текст] : учеб.пособие / Б.М. Тареев. – М.: Энергия, 2005. – 358 с.
- 8.Корицкий, Ю.В. Электротехнические материалы [Текст] : учеб.пособие для вузов / Ю.В. Корицкий. – М.: Энергоиздат, 2007. – 423 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лекция 1. Классификация электротехнических материалов.....	4
1.1 Классификация электротехнических материалов.....	4
1.2 Классификация электроизоляционных материалов (диэлектриков).....	5
Вопросы для самоконтроля.....	6
Список литературы.....	7
Лекция 2. Физические процессы в диэлектриках.....	8
1.1. Поляризация диэлектриков.....	8
1.2 Диэлектрическая проницаемость.....	9
1.3 Влияние агрегатного состояния и температуры на диэлектрическую проницаемость.....	10
Вопросы для самоконтроля.....	11
Список литературы.....	11
Лекция 3. Электропроводность в диэлектриках.....	12
1.1 Электропроводность в твердых диэлектриках.....	12
1.2 Диэлектрические потери.....	13
1.3 Электропроводность в жидких диэлектриках.....	14
1.4 Электропроводность в газообразных диэлектриках.....	15
Вопросы для самоконтроля.....	17
Список литературы.....	17
Лекция 4. Пробой диэлектриков.....	18
1.1 Пробой твердых диэлектриков.....	18
1.1.1 Электрический пробой.....	18
1.1.2 Тепловой пробой.....	19
1.1.3 Электрохимический пробой диэлектриков.....	19
1.2 Пробой газообразных диэлектриков.....	20
1.3 Пробой жидких диэлектриков.....	21
Вопросы для самоконтроля.....	21
Список литературы.....	22
Лекция 5. Физико-химические свойства диэлектриков.....	23
1.1 Механические и физико-химические свойства диэлектриков.....	23
1.1.1 Механические свойства диэлектриков.....	23
1.1.2 Физико-химические свойства диэлектриков.....	24
1.2 Краткие сведения о конкретных диэлектриках.....	26
1.2.1 Твёрдые диэлектрики.....	26
1.2.2 Газообразные диэлектрики.....	28
1.2.3 Жидкие диэлектрики.....	28
Вопросы для самоконтроля.....	30
Список литературы.....	30

Лекция 6. Физические процессы в магнитных материалах.....	31
1.1 Физические процессы в магнитных материалах.....	31
1.2 Магнитные свойства вещества под действием внешнего магнитного поля.....	31
Вопросы для самоконтроля.....	33
Список литературы.....	33
Лекция 7. Основные характеристики магнитных материалов.....	34
1.1 Основные характеристики магнитных материалов.....	34
1.2 Краткие сведения о конкретных магнитных материалах.....	35
Вопросы для самоконтроля.....	37
Список литературы.....	37
Лекция 8. Проводниковые материалы.....	39
1.1 Свойства проводниковых материалов.....	39
1.1.1 Удельное электрическое сопротивление.....	39
1.1.2 Температурный коэффициент теплового, линейного расширения.....	40
1.1.3 Коэффициент теплопроводности.....	40
1.1.4 Термоэлектродвижущая сила.....	40
1.1.5 Предел прочности при растяжении.....	40
1.1.6 Относительное удлинение.....	40
1.2 Краткие сведения о конкретных проводниковых материалах.....	40
1.2.1 Проводниковые материалы с малым сопротивлением.....	40
1.2.2 Проводниковые материалы высокого сопротивления.....	43
1.3 Обмоточные и установочные провода.....	44
Вопросы для самоконтроля.....	45
Список литературы.....	46
Библиографический список литературы.....	47
Содержание.....	48