

Министерство образования и науки Российской Федерации
Амурский государственный университет

В.В. Соловьев, А.Г. Ротачева

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Благовещенск
Издательство АмГУ
2011

ББК 31.23я73
С60

Рекомендовано учебно-методическим советом университета

Рецензенты:

Чемборисова Н.Ш., докт. техн. наук, проф. каф.

Рыбалев А.Н., канд. техн. наук, доц. каф. АППиЭ АмГУ

Соловьев В.В.Ю., Ротачева А.Г.

Электротехническое и конструкционное материаловедение :
учебно- методическое пособие. / В.В. Соловьев, А.Г. Ротачева–
Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2011. – 125с.

В пособии приведены теория, лабораторные работы и задания для самостоятельной работы студентов для изучения свойств материалов применяемых в электроэнергетике. для студентов направлению 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника».

Пособие может представлять интерес для преподавателей, студентов и аспирантов технических специальностей высших учебных заведений.

© Соловьев В.В., Ротачева А.Г. 2011
© Амурский государственный университет, 2011

Введение

Освоение любого курса наиболее успешным бывает в том случае, если студент наряду с теоретическими знаниями знакомится с предметом практически. Этой цели служат лабораторные работы и практические занятия.

Материаловедение как никакой другой курс требует конкретных знаний о свойствах большого числа материалов. При этом понятно, что важно не количество, а качество знаний. Под этим качеством понимается умение студента сориентироваться в физической сущности технической задачи и, используя справочную литературу, разыскать необходимые данные для её решения. Формированию таких навыков и служат практические занятия по курсу «Электроматериаловедение».

В пособии представлены лабораторные работы и практические задания по разнообразным классам материалов, используемых в электротехнике и электроэнергетике. Лабораторные работы посвящены изучению основных свойств диэлектрических материалов применяемых в электроэнергетике. При проведении лабораторных занятий необходимо соблюдать технику безопасности. Особенностью многих лабораторных работ является их выполнение на установках высокого напряжения. Это обстоятельство в купе с отсутствием навыков работы на установках высокого напряжения, обуславливает ряд дополнительных *обязательных* требований к организации проведенных занятий.

Прежде всего, должны выполняться следующие организационные мероприятия по безопасному проведению работ.

Во-первых, занятия по лабораторным работам осуществляются в группе студентов, не превышающей восьми человек. Во-вторых, для ведения занятий назначается два человека: преподаватель, имеющий как минимум III квалификационную группу по ТБ и заведующий лабораторией, имеющий V квалификационную группу по технике безопасности (ТБ).

Перед началом лабораторных занятий все студенты проходят вводный инструктаж по ТБ, а перед проведением конкретной лабораторной работы – инструктаж по правилам безопасности проведения опытов на данной установке. После этого каждый студент расписывается в журнале, что он прошел инструктаж, а преподаватель расписывается в том, что он провел инструктаж.

Правила техники безопасности в зале высоких напряжений

Настоящие правила распространяются на преподавателей, инженерно-технологических работников и студентов, проводящих и выполняющих лабораторные работы в зале **ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**. Требования настоящих правил являются обязательными и отступление от них не допускаются.

Запрещается выполнение распоряжений противоречащих требованиям настоящих правил.

Каждый работающий в лаборатории, если он сам не может принять меры по устранению нарушения правил, обязан немедленно сообщить вышестоящему начальству о всех замеченных им нарушениях правил, представляющих опасность для жизни людей.

При несчастных случаях с людьми снятие напряжений для освобождения пострадавшего от воздействия электрического тока должно быть произведено без предварительного разрешения.

Лица, не имеющие непосредственного отношения к кафедре энергетики или к выполнению лабораторных работ, допускаются в зал **ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ** с разрешения декана (заместителя декана) или заведующего кафедры энергетики под надзором инженера или преподавателя.

Выполнение лабораторных работ в зале высоких напряжений осуществляется группой студентов в количестве не более 8 человек под руководством инженера или преподавателя. Инженер должен иметь группу

по электробезопасности не ниже 5, преподаватель не ниже 4, студенты не ниже 2.

Группа прибывшая для выполнения лабораторных работ разбивается на две-три подгруппы (бригады), где студенты являются членами бригады. Каждую бригаду возглавляет преподаватель или инженер которые являются производителями работ.

Производитель работ отвечает:

- за соответствие рабочего места методическим указаниям;
- за четкость и полноту инструктажа членов бригады (студентов);
- за наличие, исправность и правильное применение необходимых средств защиты, инструмента, инвентаря и приспособлений;
- за сохранность на рабочем месте ограждений, знаков и плакатов безопасности, запирающих устройств;
- за безопасное проведение лабораторной работы и соблюдение настоящих Правил ТБ;
- осуществляет постоянный надзор за членами бригады.

Каждый член бригады обязан соблюдать настоящие Правила ТБ и инструктивные указания полученные при допуске к работе и во время работы, а также требования методических указаний по выполнению лабораторных работ и местных инструкций по охране труда.

Лица нарушившие правила настоящие Правила ТБ, отстраняются от выполнения лабораторной работы и удаляются из аудитории.

Перед началом выполнения лабораторных работ:

Преподавателем назначается старший в бригаде и производится распределение обязанностей, т.е. определяется, кто включает и выключает установку, кто следит за показаниями приборов и производит отчет, кто делает записи результатов.

Практические задания предназначены для самостоятельной работы студента по изучению электротехнических материалов. Каждое задание содержит пример простейшей, но близкой к реальной, конструкции,

выполненной из существующих материалов. Необходимо рассчитать либо характеристики этой конструкции при том или ином материале, либо выбрать материал, отвечающий необходимым и заданным характеристикам. При формировании заданий были использованы материалы Целебровского Ю.В. [9]

Отметим, что при этом все необходимые данные по материалам студент должен разыскать самостоятельно, используя рекомендуемую справочную литературу. Следует подчеркнуть эту особенность, отличающую задания данного сборника от привычных физических задач, когда все исходные данные задаются условием задачи. Такая постановка задания является уже элементом инженерной деятельности, включающей элемент неопределённости.

Приступая к выполнению задания по той или иной теме, студент должен освежить свои знания в рассматриваемой области. Для этого в начале каждого раздела приводится краткое описание основных используемых понятий, даются основные расчетные соотношения, используемые в разделе, и необходимые пояснения. Это, однако, не означает, что теперь можно механически использовать ту или иную формулу и получить результат. Важно в первую очередь понять физическую сущность задания и обосновать применение того или иного пути решения.

Выполняя задание, студент не «решает задачу» а ищет инженерное решение. Это накладывает особые требования к форме выполнения. Наиболее логичной и опробованной практикой является следующая форма:

Начало задания состоит в его четкой формулировке. Здесь не возникает принципиальных трудностей. Студент должен осознанно переписать текст полученного задания в начало отчета о своей работе под п.1.

Далее следует выполнить физико-математический анализ задания. Он состоит в решении поставленной задачи в общем математическом виде. Решение следует довести до конечного выражения, в котором будут содержаться как величины, определённые заданием, так и те величины,

которые необходимо отыскать в справочной литературе. Следует отдельно представить каждую из этих величин и дать ей определение.

В третьей части начинается наиболее объемная и творческая работа. Теперь, зная, значения каких величин потребуются для выполнения задания, необходимо отыскать их в справочнике. На этом этапе формируется важное для инженера умение работать со справочной литературой. Задача третьего раздела работы не только найти необходимые значения, но и подробно познакомиться с конкретными материалами, названными в задании. Ведь именно знакомство с конкретными материалами и определяет в конечном итоге эрудицию студента по курсу «Электроматериаловедение». Поэтому третий раздел отчета называется «Описание материалов». В этом разделе студент приводит все необходимые данные по материалу, начиная с его состава, технологии получения, включая основные электрические, тепловые и механические характеристики, и особо выделяет те параметры, которые необходимы для выполнения задания. Отметим, также, что все данные в разделе следует приводить со ссылками на литературу, из которой они брались. Полезно кроме номера литературы (по списку в конце выполненного задания) приводить также номера страниц и таблиц, откуда берутся данные. Это позволит уверенней защищать работу.

Завершив самый объёмный этап работы, студент проставляет необходимые найденные значения в итоговое выражение, полученное в п. 2. Полученный результат представляется в цифровом виде.

Результат заносится в текстовой форме в 5-й раздел отчета.

Последним пунктом отчета является список использованной литературы, оформленный по правилам библиографического описания.

Приведенный алгоритм выполнения задания только на первый взгляд кажется сложным. Для того чтобы облегчить освоение этого алгоритма, в начале каждого раздела даётся пример выполнения задания по теме раздела, оформленный в соответствии с изложенными рекомендациями.

По каждой теме в сборнике представлено 80 разнообразных заданий. Каждый студент группы получает индивидуальное задание, под собственным номером.

Часть первая. Теория

1 ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1. Общие сведения

Диэлектриками называют вещества, основным электрическим свойством которых является способность поляризоваться в электрическом поле. В газообразных, жидких и твердых диэлектриках электрические заряды прочно связаны с атомами, молекулами или ионами и в электрическом поле могут лишь смещаться, при этом происходит разделение центров положительного и отрицательного зарядов, т.е. *поляризация*. Используемые диэлектрики содержат и свободные заряды, которые, перемещаясь в электрическом поле, обуславливают электропроводность - способность диэлектрика пропускать постоянный электрический ток. Однако количество таких свободных зарядов в диэлектрике невелико, поэтому ток весьма мал. Следовательно, для диэлектрика характерным является большое сопротивление прохождению постоянного тока.

Диэлектрическими материалами называют класс электротехнических материалов, предназначенных для использования их диэлектрических свойств (большое сопротивление прохождению электрического тока и способность поляризоваться).

Электроизоляционными материалами называют диэлектрические материалы, предназначенные для создания электрической изоляции токоведущих частей в электротехнических и радиоэлектронных устройствах. Электрическая изоляция является неотъемлемой частью электрической цепи и, прежде всего, нужна для того, чтобы не пропускать ток по не предусмотренным электрической схемой цепям.

Используемые в качестве электроизоляционных материалов диэлектрики называют *пассивными*. Широко применяются так называемые *активные* диэлектрики, параметры которых можно регулировать, изменяя напряженность электрического поля, температуру, механические

напряжения и другие параметры воздействующих на них факторов. Например, конденсатор, диэлектрическим материалом в котором служит пьезоэлектрик, под действием приложенного переменного напряжения изменяет свои линейные размеры и становится генератором механических колебаний. Емкость электрического конденсатора, выполненного из нелинейного диэлектрика - сегнетоэлектрика, изменяется в зависимости от напряженности электрического поля; если такая емкость включена в колебательный LC-контур, то изменяется и его частота настройки.

По агрегатному состоянию диэлектрические материалы разделяются на газообразные, жидкие и твердые. По происхождению различают диэлектрические материалы природные, которые могут быть использованы без химической переработки, искусственные, изготавливаемые химической переработкой природного сырья, и синтетические, получаемые в ходе химического синтеза.

По химическому составу их разделяют на органические, представляющие собой соединения углерода с водородом, азотом, кислородом и другими элементами; элементорганические, в молекулы которых входят атомы кремния, магния, алюминия, титана, железа и других элементов; неорганические, не содержащие в своем составе углерода.

Электрические, термические, механические и физико-химические свойства, характеризующие процессы воздействия на диэлектрики электрического поля, высоких и низких температур, механических нагрузок, ионизирующих излучений, различных газов и жидкостей, климатических факторов, а также тропических условий и других факторов, процессы, происходящие в диэлектрических материалах в ходе технологий их получения, переработки и эксплуатации, определяются природой сил связей, действующих между частицами, из которых построен диэлектрик, и строением диэлектрика.

Для газообразных диэлектриков характерным является соотношение размера r частиц и расстояния l между ними ($r \ll l$). Поэтому силы взаимодействия частиц невелики и обуславливаемая ими потенциальная энергия U невелика по сравнению с их кинетической (тепловой) энергией kT : $U \ll kT$.

В жидкостях $r > l$, между частицами действуют межмолекулярные (с энергией 0.1..0.01 эВ на одну связь) и водородные связи (1 эВ на одну связь), обуславливающие $U > kT$. Однако kT части достаточно для их хаотического перемещения; для жидкости характерна *текучесть*.

В твердых телах $r > l$, действующие между частицами ковалентные (3...5 эВ на одну связь), ионные (2...4 эВ на одну связь) или межмолекулярные и водородные связи обуславливают такое соотношение $U > kT$, что частицы закреплены и совершают лишь тепловые колебания в закрепленных положениях; для твердого тела характерна *жесткость* по отношению к сдвигу.

Из многообразия свойств диэлектрических материалов, определяющих их техническое применение, главными, характерными являются электрические свойства - электропроводность, поляризация и диэлектрические потери, электрическая прочность и электрическое старение.

Техника, технология производства и эксплуатация электротехнического и радиоэлектронного оборудования предъявляют самые разнообразные требования к свойствам диэлектрических материалов. Кроме нужных электрических свойств диэлектрические материалы должны обладать еще и требуемыми термическими, механическими и многими другими свойствами.

1.2. Электропроводность диэлектриков

Используемые диэлектрики содержат в своем объеме небольшое количество свободных зарядов, которые перемещаются в электрическом поле. Поэтому диэлектрики на постоянном токе пропускают весьма малый ток. Этот ток называют *сквозным током утечки*.

На рис. 1.1 схематически изображен участок твердой изоляции с расстоянием h (м) между электродами 1 и 2 и сечением $S = b * l$ по которому протекает сквозной ток утечки I_T (А). Ток I_T складывается из объемного тока утечки I_v , протекающего через объем, и поверхностного тока утечки I_s , протекающего по поверхности изоляции от электрода 1 к электроду 2. Если к электродам приложено напряжение U , то проводимость такого участка изоляции $G_{из} = I_{из}/U$. Величина, обратная $G_{из}$, называется *сопротивлением изоляции*:

$$R_{из} = 1/G_{из} \text{ (Ом)}.$$

Для твердых диэлектриков ток I_v определяет значение объемной G_v , а ток I_s - поверхностной G_s проводимости изоляции и соответственно объемное R_v и поверхностное R_s сопротивления.

Электропроводность диэлектрика характеризуют: *удельной объемной* σ и *поверхностной* ρ_s проводимостью или *удельным объемным* ρ и *поверхностным* ρ_s сопротивлением. Если объемное сопротивление изоляции R_v то $\rho = R_v S/h$. Приняв, что рассматриваемый участок имеет форму куба, где $h = b = l = 1\text{м}$, получим, что ρ имеет размерность Ом*м, а объемная проводимость σ - См/м.

Поверхностный ток утечки I_s протекает по участку диэлектрика длиной h от электрода 1 к 2, периметр которых $P = 2(l + b)$. Поэтому удельное поверхностное сопротивление $\rho_s = P/h$, а проводимость σ .

Для газообразных и жидких диэлектриков поверхностное сопротивление и проводимость не определяются.

При подаче на испытуемый образец постоянного напряжения через диэлектрик протекают сквозной ток утечки и ток абсорбции, который вызывается процессом установления медленных видов поляризации и спадает со временем. В большинстве диэлектриков это время меньше 60 с. Поэтому сопротивление образца измеряют после выдержки его под напряжением в течение 1 мин.

Физическая природа электропроводности диэлектриков. Удельная проводимость $\sigma = nq\mu$ определяется числом носителей заряда n в единице объема вещества, зарядом q и подвижностью μ носителя заряда.

Подвижностью $\mu = v/E$ носителя заряда называют отношение скорости v упорядоченного перемещения заряда в электрическом поле к напряженности E .

В диэлектриках свободными зарядами, которые перемещаются в электрическом поле и обуславливают электропроводность, могут быть ионы (положительные и отрицательные), электроны и электронные вакансии (дырки), поляроны. Такие свободные заряды образуются в результате нагревания диэлектрика; происходит термическая диссоциация частиц при воздействии на диэлектрик света или при его ионизирующем (радиационном) облучении. В сильных электрических полях возможна инжекция зарядов (электронов, дырок) в диэлектрик из металлических электродов; заряды (ионы) могут инжектироваться в диэлектрик, если электродами служат вода или другая жидкость (электролиты), в которой имеются свободные положительные или отрицательные ионы. В сильных электрических полях свободные заряды (ионы и электроны) образуются в диэлектрике в результате ударной ионизации, когда свободные заряды, главным образом электроны, ускоряются в электрическом поле и приобретают энергию, которая достаточна, чтобы при соударении такого ускоренного электрона с молекулой или атомом вещества произошла их ионизация.

В жидких диэлектриках в процессе эксплуатации под действием электрического поля и теплоты происходят химические процессы, в результате которых продукты окисления образуют в жидкости твердые частицы коллоидного размера (диаметр частицы 10^{-6} м). Такие твердые частицы попадают в жидкость тогда, когда в ней размещены устройства с органической изоляцией и происходит постепенное разрушение изоляции. В жидкость попадают пыль и влага из воздуха. Частицы на свою поверхность

адсорбируют (собирают) имеющиеся в жидкости ионы и поэтому заряжаются. Если диэлектрическая проницаемость вещества, из которого состоит частица, больше диэлектрической проницаемости жидкости, то она заряжается положительно. В противном случае на частице собираются отрицательные ионы. Такая заряженная частица называется *молионом*. В электрическом поле она перемещается к электроду, где обменивается с ним зарядом, нейтрализуется и оседает на электроде.

Положительно заряженные ионы называют *катионами* потому, что они перемещаются в электрическом поле к катоду, отрицательные - *анионами*, они перемещаются к аноду. На электродах происходит обмен зарядами между электродами и ионами, ионы нейтрализуются и на электродах выделяются продукты нейтрализации - металлы или газы.

Процесс электропроводности, обусловленный перемещением ионов и молионов, связан с переносом вещества – ионов, молионов. Поэтому при постоянном напряжении с течением времени концентрация таких заряженных частиц в объеме диэлектрика уменьшается, изменяются протекающий ток и удельная проводимость диэлектрика.

Электронная электропроводность может наблюдаться в газообразных, жидких и твердых диэлектриках. Она становится преобладающей в сильных электрических полях. Процесс электронной электропроводности кристаллических твердых диэлектриков основан на представлениях зонной теории электропроводности твердых тел.

В диэлектриках ширина запрещенной зоны $\Delta E = 3 \dots 7 \text{ эВ}$. Энергию, достаточную для перехода в зону проводимости, электроны могут приобрести в процессе нагревания или при облучении диэлектрика светом, квантами, энергия которых больше ширины запрещенной зоны, а также при помещении диэлектрика в сильное электрическое поле. Электроны могут инжектироваться в диэлектрик из металла электродов. Далее электрон

перемещается в кристалле в зоне проводимости, обуславливая электронную электропроводность.

В слабых электрических полях электронная электропроводность незначительна. Свободные электроны, которые попадают в диэлектрик, поляризуют некоторую окружающую их область диэлектрика: вокруг электрона имеет место «шуба», состоящая из поляризованной области диэлектрика. Электрон, окруженный поляризованной областью, называют *поляроном*. Если электроны перемещаются в электрическом поле, то перемещается и «шуба», то есть перемещается полярон. Это во много раз повышает эффективную массу электрона, и скорость упорядоченного движения электрона уменьшается. Поэтому проводимость при таком механизме перемещения электрона невелика.

В газообразных и жидких диэлектриках электроны связываются с молекулами, образуются отрицательно заряженные комплексы, которые перемещаются в электрическом поле. В слабых электрических полях подвижность таких носителей заряда невелика, поэтому электронная проводимость мала.

Электропроводность газообразных диэлектриков. В слабых электрических полях удельная проводимость газов мала. Например, удельное объемное сопротивление воздуха при нормальных условиях 10^{18} Ом*м. Ток в таких условиях возникает в результате перемещения свободных ионов и электронов, которые образуются под действием ионизирующих излучений земной коры, космических лучей, ультрафиолетового излучения солнца, нагревания. Такие факторы ионизации называют внешними. Наряду с ионизацией в газе происходит рекомбинация, возникающая в следствии объединения положительных ионов и электронов, совершающих непрерывное хаотическое тепловое движение. В результате рекомбинаций образуются молекулы газа, не имеющие заряда, нейтральные молекулы.

В электрическом поле часть из образовавшихся ионов передвигается к электродам и там нейтрализуется. Этот процесс определяет плотность тока j , которая растет при увеличении E по закону Ома (рис. 1.2, участок 1).

В поле E_x все заряженные частицы, которые образуются в диэлектрике под действием внешних ионизаторов, уносятся электрическим полем к электродам, не рекомбинируя, а ток, протекающий через диэлектрик, достигает насыщения (рис. 1.2, участок 2). Ток насыщения зависит от расстояния h между электродами в конденсаторе. Например, в воздухе при нормальных условиях при $h = 0,01$ м напряженность $E_1 = 0,6$ В/м, плотность тока

$$j_{\text{нас}} = 6 \cdot 10^{-15} \text{ А/м}^2; \text{ при } h = 0,1 \text{ м напряженность } E_1 = 6,0 \text{ В/м и } j_{\text{нас}} = 6 \cdot 10^{-14} \text{ А/м}^2$$

Рабочие напряженности электрического поля в диэлектрике намного больше, следовательно, газовый диэлектрик всегда работает в условиях насыщения.

При напряженностях, больших 2, в газах начинается процесс ударной ионизации (рис. 1.2, участок 3). Образующиеся под действием внешних ионизаторов заряженные частицы ускоряются в электрическом поле и на длине свободного пробега приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа. Число заряженных частиц увеличивается, ток растет, что приводит к пробоем газовой промежутка. Для воздуха при нормальных условиях процесс ударной ионизации наступает при $E_{\text{и}} = 10^6$ В/м.

Если в газообразном диэлектрике содержатся взвешенные частицы - примеси или специально введенные малых размеров частицы смол, измельченной керамики, мельчайшие капельки жидких диэлектриков, то образующиеся в результате ионизации молекул газа ионы и электроны оседают на поверхности частиц, заряжают их. Заряженные частицы перемещаются в электрическом поле, и ток, протекающий через диэлектрик, становится большим. Такой процесс используют в технологии нанесения на различные детали и конструкции электроизолирующих слоев под действием электрического поля.

Электропроводность жидких диэлектриков. В неполярных жидких диэлектриках диссоциация молекул на ионы незначительна, поэтому число носителей заряда в единице объема невелико и проводимость мала. Источниками ионов в неполярной жидкости могут быть примеси - влага, различные полярные жидкости, частицы твердых веществ, молекулы которых диссоциируют на ионы. В таких случаях проводимость жидкости называют *примесной*. Молекулы полярных жидкостей диссоциируют в большей степени, поэтому их проводимость большая. Если в полярной жидкости содержится даже небольшое количество полярной примеси, то ее молекулы диссоциируют, возрастает и количество диссоциировавших молекул жидкости, проводимость сильно увеличивается.

Перемещение иона в жидкости происходит следующим образом. Ион совершает тепловые колебания в положении временного закрепления с частотой $\nu = (10^{12} \dots 10^{13})$ Гц. В результате ион преодолевает силы взаимодействия с соседними молекулами и перемещается, «перескакивает» в новое положение временного закрепления, которое отстоит от прежнего на расстояние, равное межмолекулярному расстоянию (10^{-10} м). Силы взаимодействия иона с молекулами принято характеризовать *энергией активации*, потенциальным барьером, который ион преодолевает при переходе в новое положение временного закрепления. Если напряженность электрического поля равна нулю, то такие перемещения равновероятны в любом из направлений. В электрическом поле перемещение становится направленным и обуславливает перенос заряда, электропроводность.

Для такого механизма перемещения иона температурная зависимость удельной проводимости жидкого диэлектрика

$$\sigma = \frac{n_0 q^2 \delta^2 \nu}{6kT} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (4.1)$$

где n_0 - число носителей заряда в единице объема диэлектрика, m^{-3} ; q - заряд иона, Кл; δ - межмолекулярное расстояние, м; ν - частота колебаний иона в положении временного закрепления, Гц; W - энергия активации процесса электропроводности, Дж; k - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Значение величины σ жидкого диэлектрика с ростом температуры T увеличивается, а удельное сопротивление $\rho = 1/\sigma$ уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 4.3, а). Предэкспонента с ростом температуры изменяется намного меньше, чем экспонента $\exp[-W/(kT)]$. Поэтому зависимости $\ln \sigma$ и $\ln \rho$ представляют собой прямые линии (рис. 1.3, б).

Увеличение проводимости с ростом температуры связано с увеличением подвижности носителей заряда. Подвижность увеличивается, так как растет скорость упорядоченного движения ионов, что связано с уменьшением вязкости жидкости. Еще в большей степени проводимость увеличивается за счет роста числа n_0 носителей заряда. С увеличением температуры по экспоненциальному закону растет диссоциация молекул жидкости и примесей. Тщательно очищенные жидкие диэлектрики имеют большое удельное сопротивление.

В сильных электрических полях, начиная с критической напряженности $(1 \dots 5) \cdot 10^7$ В/мВ жидкости переход иона из положения временного закрепления в другое происходит не только в результате тепловых колебаний частиц, а и под влиянием электрического поля. Поэтому растет подвижность μ иона, и, начиная с некоторого значения плотности тока j_0 , плотность тока увеличивается по закону $j = j_0 \exp(aE)$, где j_0 - плотность тока при критической напряженности; a - эмпирический коэффициент.

Возможен рост числа носителей зарядов благодаря увеличению количества диссоциировавших молекул. В сильном поле деформация молекул становится настолько большой, что они распадаются на ионы. В

этом случае ток изменяется с ростом напряженности: $j = j_0 \exp(bE^{0,3})$, где b - эмпирический коэффициент.

В сильных полях возможно увеличение концентрации носителей заряда из-за инжекции электронов с металла электродов и ударной ионизации молекул ускоренными электронами. Нелинейный рост плотности тока с ростом напряженности $j = kE^2 \exp(-p/E)$, где k и p - постоянные, характерные для данного жидкого диэлектрика.

Электропроводность твердых диэлектриков. В используемых в технике твердых диэлектриках - бумагах, картоне, лаках, эмалях, компаундах, пленках, керамике и стеклах, слюде и др. - характерной является ионная электропроводность. При нагревании или освещении, действии радиации, сильного электрического поля сначала ионизируются содержащиеся в таких диэлектриках дефекты и примеси. Образовавшиеся таким образом ионы определяют низкотемпературную примесную область электропроводности диэлектрика. Как и в жидком диэлектрике, такие ионы занимают места временного закрепления и относительно слабо связаны с окружающими частицами. В результате тепловых колебаний они преодолевают потенциальный барьер W , который составляет обычно 0,5... 1,0 эВ, и скачком перемещаются в другое положение. В электрическом поле такие перемещения ионов становятся направленными, ионы перемещаются к электродам.

При интенсивном нагревании или при более сильных других воздействиях ионизируются основные частицы, из которых построен твердый диэлектрик. Удельная проводимость в этом случае изменяется с ростом температуры с большей скоростью, так как число ионов, образовавшихся при ионизации основных частиц, намного больше числа ионов, образовавшихся при ионизации дефектов или примесей.

Потенциальный барьер W и энергия активации процесса электропроводности для основных ионов больше, чем для дефектов или

примесей. Эта область электропроводности называется *высокотемпературной собственной*.

Температурная зависимость удельной проводимости твердого диэлектрика с ионной электропроводностью такая же, как и для жидкого диэлектрика. Поэтому формула (1.1) справедлива для твердых диэлектриков. Если в твердом диэлектрике наблюдается примесная и собственная ионная электропроводность, то

$$\sigma = A_1 \exp\left(-\frac{W_1}{kT}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{W_2}{kT}\right), \quad (4.2)$$

где A_1 , W_1 и A_2 , W_2 , - параметры, характеризующие соответственно примесную и собственную электропроводность.

В процессе ионной электропроводности катионы и анионы обмениваются зарядами с электродами и таким образом нейтрализуются, на электродах осаждается металл, выделяются газы, собираются частички примесей. Может наблюдаться также постепенное разрушение металлического электрода, и металл диффундирует в диэлектрик. В результате около электродов могут образовываться длинные тончайшие (с диаметром, равным нескольким микрометрам) ветвистые нити, которые называют *дендритами*. При больших температурах рост дендритов интенсифицируется и они могут «прорасти» через весь образец и замкнуть электроды накоротко.

В сильных электрических полях подвижность ионов нелинейно увеличивается с ростом напряженности. Поэтому, как и в жидких диэлектриках, в твердых ток увеличивается нелинейно с ростом напряженности электрического поля.

На поверхности токоведущих частей электротехнических устройств могут существовать технологически трудноустраняемые острые выступы, кромки, около которых вследствие неоднородности электрического поля напряженность может достигать $10^5 \dots 10^8$ В/м. В таких электрических полях возможна инжекция в приэлектродный слой диэлектрика электронов с

металла катода и дырок с анода. При толщине электроизоляционного слоя 5...10 мкм глубина приэлектродного слоя 1...2 мкм.

В органических и неорганических диэлектриках, используемых в технике, могут иметь место несовершенства структуры, такие, как примеси и дефекты. В результате образуются ловушки для электронов с глубиной 0,1...0,3 эВ. Электроны могут быть высвобождены из таких ловушек и переведены в зону проводимости посредством нагревания, облучения светом, ионизирующим излучением, воздействия сильного электрического поля. Такие механизмы генерации электронов и дырок обуславливают электронную электропроводность диэлектрика (рис. 1.5). Свободные электроны в сильных электрических полях могут образовываться и в результате ударной ионизации. На участке 1 уменьшение ρ вызывается увеличением концентрации носителей заряда из-за ионизации ловушек. Этот участок называется *областью примесной электропроводности*. На участке 2, где все ловушки ионизированы, увеличение сопротивления обуславливается торможением носителей заряда при их взаимодействии с совершающими тепловые колебания частицы, из которых построен диэлектрик. На участке 3 энергия, которую получает диэлектрик при нагревании, достаточна для ионизации собственных частиц. Поэтому концентрация носителей заряда снова начинает расти, теперь уже с большей скоростью, и сопротивление снова начинает уменьшаться.

1.3. Поляризация диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость и поляризованность.

На рис. 4.8 изображены два плоских конденсатора, площадь электродов которых S , а расстояние между ними k . В конденсаторе (рис. 1.8, а) между электродами вакуум, в конденсаторе (рис. 1.8, б) - диэлектрик. Если электрическое напряжение на электродах U , то напряженность электрического поля $E = U/k$. Электрический заряд, накопленный в конденсаторе с вакуумом, называется свободным зарядом Q_a (на рис. 1.8, а - квадраты).

В электрическом поле в частицах, из которых построен диэлектрик, связанные положительные и отрицательные заряды смещаются. В результате образуются электрические диполи с электрическим моментом $m = ql$, где q - суммарный положительный (и численно равный ему суммарный отрицательный) заряд частицы, Кл; l - расстояние между центрами положительного и отрицательного заряда, плечо диполя, м (см. рис. 1.8, б). Поэтому на поверхности диэлектрика образуются поляризационные (связанные) заряды (на рис. 1.8, б - кружки): отрицательный у положительного электрода и положительный у отрицательного. Для компенсации этих поляризационных зарядов источником электрического напряжения создается дополнительный связанный заряд. Суммарный, полный заряд в конденсаторе с диэлектриком Q_d

$$Q = Q_0 + Q_d = \epsilon_r Q_0, \quad (4.4)$$

где ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость.

Электрическая емкость конденсатора с вакуумом между электродами

$$C_0 = Q_0 / U. \quad (4.5)$$

Емкость C_0 называют *геометрической емкостью* конденсатора. Емкость этого конденсатора с диэлектриком между электродами

$$C = Q / U. \quad (4.6)$$

Из формул (4.4) и (4.5) с учетом (4.3) следует, что ϵ_r равна отношению емкости конденсатора с диэлектриком к емкости того же конденсатора, где между электродами вакуум: $\epsilon_r = C / C_0$

Диэлектрическая проницаемость является важнейшим макроскопическим параметром диэлектрика, характеризующим процесс поляризации, и она может быть найдена по измеренной емкости конденсатора с диэлектриком.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S / h, \quad (4.7)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м- электрическая постоянная.

Произведение $\varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon$, называется абсолютной диэлектрической проницаемостью.

Емкость цилиндрического конденсатора

$$C = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r l / \ln(d_2/d_1) \quad (4.8)$$

Значения длины l и диаметров внутреннего d_1 и внешнего d_2 электродов выражают в метрах.

Измерения емкости на частоте 50 Гц обычно производят по стандартизированной методике с помощью четырехплечего моста.

Поляризованное состояние диэлектрика характеризуется также электрическим моментом единицы объема, *поляризованностью* P (Кл/м²), которая связана с диэлектрической проницаемостью:

$$P = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) E$$

Поляризованность является векторной величиной. На рис. 1.8, б для конденсатора с диэлектриком схематически изображены частицы диэлектрика, в каждой из которых в результате поляризации образовался электрический момент m . Тогда, по определению, $P = \eta m$, где η - число частиц в единице объема.

Электрический момент, который возник в результате поляризации частицы, по определению $m = \alpha E$, где α - *поляризуемость* частицы, Фм². Это микроскопическая характеристика поляризации. Поляризуемость α связана с диэлектрической проницаемостью ε_r . Такая связь выражается уравнением Клаузиуса- Мосотти:

$$\varepsilon_r = \frac{1 + \frac{2n\alpha}{3\varepsilon_0}}{1 - \frac{n\alpha}{3\varepsilon_0}} \quad (4.9)$$

Физическая природа поляризации. Принято различать упругую (быструю, нерелаксационную) и неупругую (медленную, релаксационную) поляризации.

Упругая поляризация завершается мгновенно за время t , намного меньшее полупериода $T/2 = 1/(2f)$ (f - частота, Гц) приложенного напряжения. Поэтому процесс быстрой поляризации создает в диэлектрике только реактивный ток. К таким (быстрым) поляризациям относятся электронная (завершается за время $10^{-16} \dots 10^{-15}$ с) и ионная упругая (завершается за время $10^{-14} \dots 10^{-13}$ с). *Неупругая* поляризация завершается за время, соизмеримое с $T/2$.

Электронная поляризация. В электрическом поле в атомах, ионах или молекулах, из которых построен диэлектрик, деформируются (смещаются) электронные оболочки, главным образом внешние. Смещение электронов происходит на малые (10^{-13} м) расстояния в пределах своих атомов и молекул. Такая поляризация происходит у всех диэлектриков независимо от их агрегатного состояния и существования в них других видов поляризации.

На рис. 1.9, а схематически изображены деформация в электрическом поле электронной оболочки атома водорода и образование в поляризованной частице квазиупругого (как бы упругого) электрического момента m .

Диэлектрики, у которых имеет место только электронная поляризация, называются *неполярными* диэлектриками. В молекулах неполярных диэлектриков центры положительного и отрицательного зарядов совпадают, поэтому такие молекулы неполярны. Например, неполярными диэлектриками являются газы: гелий, водород, азот, метан; жидкости - бензол, тетраформ (четырёххлористый углерод); твердые - алмаз, полиэтилен, фторопласт-4, парафин. Для неполярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость ϵ_r и коэффициент лучепреломления света n_D связаны соотношением $\epsilon_r = \bar{n}_D^2$. Рассчитанную по такой формуле ϵ_r называют диэлектрической проницаемостью, измеренной в электрическом поле бесконечно большой частоты, и обозначают ϵ_{rc} .

Значение диэлектрической проницаемости газообразных диэлектриков мало отличается от 1, а для неполярных жидких и твердых диэлектриков не превышает 2,5.

При увеличении температуры число частиц η в единице объема диэлектрика уменьшается, а поэтому уменьшается и ε_2 [см. формулу (1.7)]. Изменение диэлектрической проницаемости при повышении температуры характеризуют температурным коэффициентом $TK\varepsilon_r = (1/\varepsilon_r)(d\varepsilon_r/dT)$

Изменения η с ростом температуры незначительны. Поэтому ε_r неполярных диэлектриков при увеличении температуры уменьшается незначительно (рис. 1.10). В табл. 1.1 приведены значения $TK\varepsilon_r$ для некоторых неполярных диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость неполярных диэлектриков не изменяется с ростом частоты приложенного напряжения до значений $10^{12} \dots 10^{13}$ Гц. Это свидетельствует о том, что процесс электронной поляризации происходит за время, намного меньшее $10^{-13} \dots 10^{-12}$ с.

Ионная упругая поляризация. Она происходит в кристаллических диэлектриках, построенных из положительных и отрицательных ионов: в галоидо-щелочных кристаллах, слюде, керамике. В электрическом поле в таких диэлектриках происходит смещение электронных оболочек в каждом ионе - электронная поляризация. Смещаются друг относительно друга подрешетки из положительных и отрицательных ионов (см. рис. 1.9, б), т.е. происходит упругая ионная поляризация. Это смещение приводит к появлению дополнительного электрического момента $m_{и}$, увеличивающего поляризованность, а, следовательно, и диэлектрическую проницаемость на $\varepsilon_{и}$. Таким образом, диэлектрическая проницаемость ионного кристалла $\varepsilon_r = \varepsilon_{эс} + \varepsilon_{и}$, где $\varepsilon_{и}$ зависит от физической природы ионов, сил их взаимодействия и строения кристаллической решетки. Ионная поляризация завершается за $10^{-13} \dots 10^{-12}$ с, поэтому ε_r ионных кристаллов не зависит от частоты приложенного напряжения (до $10^{12} \dots 10^{13}$ Гц).

С увеличением температуры и связанного с этим уменьшения η значения ϵ_{rc} и ϵ_{rn} уменьшаются. Однако вызванное тепловым расширением увеличение межионных расстояний приводит к ослаблению сил связи между ионами и поэтому к увеличению их смещения в электрическом поле, а следовательно, к росту ϵ_{rn} . Причем такое увеличение ϵ_{rn} намного больше, чем уменьшение за счет теплового расширения. Таким образом, ϵ_r ионных кристаллов с ростом температуры увеличивается ($\frac{d\epsilon_r}{dT} > 0$), как у кристалла NaCl (рис. 1.11).

Неупругие поляризации. К неупругим поляризациям относится дипольная поляризация, которая наблюдается в полярных газообразных и жидких диэлектриках. Полярные диэлектрики построены из полярных молекул, в которых центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Полярная молекула имеет собственный электрический момент (дипольный момент) μ_d (Кл·м) (см. рис. 1.9, в). Из полярных молекул состоят газообразные аммиак NH_3 , пары воды и спиртов. Полярными жидкостями являются вода, хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ и нитробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$. В электрическом поле

в таких молекулах смещаются электронные оболочки атомов - совершается электронная поляризация. Происходит дипольная поляризация: моменты μ_d молекул несколько ориентируются по полю E (см. рис. 1.9, в). В результате такой поляризации увеличивается P , а следовательно, ϵ_r . Поворот молекулы в электрическом поле наблюдается в полярных газообразных и жидких диэлектриках, вязкость которых невелика. В твердых полярных диэлектриках процесс дипольной поляризации состоит в деформации участков - звеньев, сегментов молекул или ориентации отдельных полярных групп молекул.

Для ориентации диполя требуется время, называемое *временем релаксации* τ . После снятия внешнего поля в течение τ под действием теплового движения

ориентация полярной молекулы по полю уменьшается в e раз (e - основание натурального логарифма).

Время релаксации прямо пропорционально вязкости диэлектрика и обратно пропорционально температуре. При увеличении температуры вязкость диэлектрика экспоненциально уменьшается, поэтому уменьшается и τ . В этой области температур ϵ_r с ростом температуры увеличивается (рис. 1.12, а, участок *бв*). Уменьшение ϵ_r на участке *вг* вызывается разориентацией полярных молекул в результате теплового движения; на участке *аб* - уменьшением плотности.

Если $T/2 < \tau$, то электрические моменты полярных молекул не успевают ориентироваться в электрическом поле и дипольная поляризация уменьшается. Поэтому ϵ_r полярного диэлектрика уменьшается (рис. 4.12, б). В зависимости от строения диэлектрика и внешних условий время релаксации τ дипольной поляризации изменяется в широких пределах (от 10^{-8} до 10^{-1} с)

При ориентации в электрическом поле диполи преодолевают межмолекулярные силы взаимодействия, поворачиваются с «трением»; в этой области температур дипольная поляризация происходит с потерями.

Ионно-релаксационная поляризация. Используемые в технике твердые диэлектрики могут иметь неплотную упаковку объема частицами. В таких материалах образуются ионы, которые в ходе тепловых колебаний перемещаются из положений временного закрепления на расстояния, соизмеримые с расстояниями между частицами (10^{-10} м), и закрепляются в новых положениях. В электрическом поле такие перемещения становятся направленными. В результате в диэлектрике возникает различие в расположении центров положительного и отрицательного зарядов, т.е. появляется электрический момент. Такой процесс называют ионно-релаксационной поляризацией. С ростом температуры число ионов, перемещаемых в новые положения, увеличивается, поэтому растут

поляризованность и диэлектрическая проницаемость. На рис. 1.13 приведена зависимость ϵ_r от температуры для натриево-силикатного стекла, в структуре которого имеют место слабо связанные ионы.

Миграционная поляризация. Электроизоляционные материалы могут быть неоднородными, состоящими из диэлектриков, у которых ϵ_r и σ различаются. На рис. 1.14, а изображен электрический конденсатор с неоднородным (двухслойным) диэлектриком, а на рис. 4.14, в - конденсатор, состоящий из многих блоков, как это имеет место, например, в поликристаллическом материале.

Если в двухслойном диэлектрике $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r2}$ и $\sigma_1 > \sigma_2$, то при подаче на электроды постоянного напряжения в начальный момент времени плотность тока в первом слое будет больше. Это приводит к образованию на границе раздела положительного заряда $^{+\Delta Q}_{\text{доб}}$ (рис. 1.14, б). По мере накопления заряда устанавливается состояние, когда плотности токов в первом и втором слоях равны. В диэлектрике, состоящем из многих блоков с различными ϵ_r и σ , дополнительные заряды образуются на границах блоков (рис. 1.14, г). Этот вид поляризации называется *межслоевой миграционной* поляризацией. В диэлектрике могут иметь место такие слабо связанные ионы, которые в результате тепловых перемещений под действием поля направляются к электродам и там закрепляются, локализуются. В результате около электродов образуется объемный заряд $Q_{\text{выс}}$, обуславливающий электрический момент $M = Q_{\text{выс}} h$, где h -

расстояние между электродами. Такую поляризацию называют *объемно-зарядовой* поляризацией или высоковольтной поляризацией. Процессы миграционной поляризации одни из самых медленных. Время на их завершение $10^{-3} \dots 1$ с.

Рис. 1.14. Модели процессов миграционной поляризации в диэлектриках с неоднородной структурой: *a, б* - двухслойном; *в, г* - блочном; *д* - с высоковольтной поляризацией

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация. Доменная поляризация. Сегнетоэлектрики. Характерные для сегнетоэлектриков свойства впервые были обнаружены у сегнетовой соли. В дальнейшем сегнетоэлектриками стали называть вещества, свойства которых подобны свойствам сегнетовой соли. В сегнетоэлектриках даже в отсутствии электрического поля наблюдается самопроизвольное смещение частиц - ионов в ионных кристаллах или полярных радикалов молекул, которое приводит к несовпадению центров положительного и отрицательного зарядов в объеме диэлектрика, то есть поляризации. Такая поляризация называется спонтанной (самопроизвольной). В результате в диэлектрике образуются области - домены. В каждом домене частицы, обуславливающие самопроизвольную поляризацию, смещены в одном направлении. В этом направлении ориентирован и вектор спонтанной поляризованноеTM P_s домена. В соседних доменах направление P_s может быть противоположным или перпендикулярным направлению P_s (рис. 1.15, *a*).

В электрическом поле в сегнетоэлектриках происходят упругие электронная и ионная поляризации, а также неупругая доменная. В процессе доменной поляризации векторы P_s доменов ориентируются по направлению электрического поля (рис. 4.15, б). Переориентацией направлений P_s доменов объясняются характерные для сегнетоэлектриков нелинейные свойства: диэлектрический гистерезис и резкая зависимость их диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля (рис. 4.15, в, г).

Рис. 1.15. Схемы сегнетоэлектриков: а - домены; б - доменная поляризация; в - петля диэлектрического гистерезиса; г - зависимость ϵ_2 от напряженности электрического поля; д - зависимости ϵ^{\wedge} и Р от температуры

Поляризованность Р кристалла с ростом напряженности электрического поля Е увеличивается благодаря ориентации Р доменов и достигает поляризованное насыщения $P_{нас}$. С уменьшением напряженности при Е = 0 наблюдается остаточная поляризованность $P_{ост}$, так как в диэлектрике сохраняется вызванная электрическим полем ориентация доменов. Уменьшить поляризованность Р до нуля можно, приложив к образцу электрическое поле E_c . Напряженность E_c называется *коэрцитивной силой*.

Для сегнетоэлектриков характерны большая (до нескольких тысяч) диэлектрическая проницаемость и ее резкая зависимость от температуры (рис. 1.15, б). Увеличение температуры приводит к ослаблению сил, препятствующих ориентации доменов. Поляризованность диэлектрика, вызванная доменной поляризацией, увеличивается, а ϵ_r достигает максимального значения при температуре T_k , которую называют температурой Кюри. Спонтанная поляризованность при температуре Кюри исчезает. При $T > T_k$ сегнетоэлектрик теряет свои сегнетоэлектрические свойства и переходит в так называемое параэлектрическое состояние, при котором сохраняется нелинейная зависимость ϵ_r от напряженности электрического поля.

1.4. Диэлектрические потери

Удельные диэлектрические потери и угол диэлектрических потерь.

Диэлектрическими потерями называют мощность, поглощаемую диэлектриком под действием приложенного напряжения. Потери мощности вызываются электропроводностью и медленными поляризациями. Если в диэлектрике имеют место газовые включения (поры), то в процессе работы его при высоких напряжениях и высоких частотах происходит ионизация газа в порах, что вызывает потери на ионизацию.

При включении на постоянное напряжение конденсатора, между электродами которого находится диэлектрик, через него протекает уменьшающийся со временем ток $I = I_{абс} + I_{ск}$ (рис. 1.16, а).

Ток смещения (емкостной ток) I_c вызван смещением электронных оболочек в атомах, ионах и молекулах, т.е. процессом установления быстрых, упругих поляризаций; он спадает в течение $10^{-16} \dots 10^{-15}$ с, поэтому не вызывает рассеяния энергии в диэлектрике.

Спадающий со временем ток абсорбции $I_{абс}$ обусловлен смещением связанных зарядов в ходе медленных поляризаций и вызывает рассеяние энергии в диэлектрике, диэлектрические потери.

Сквозной ток утечки $I_{ск}$ вызван перемещением свободных зарядов в диэлектрике в процессе электропроводности, не изменяется со временем (если не происходит электроочистка диэлектрика или его старение, деградация) и вызывает потери, аналогичные джоулевым потерям в проводниках.

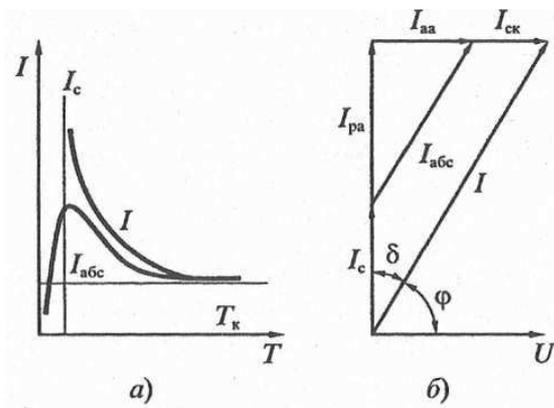


Рис. 4.16. Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени при постоянном напряжении (а) и векторная диаграмма токов, протекающих через диэлектрик при переменном напряжении (б)

Следовательно, при постоянном напряжении потери, вызванные током Абсорбции, имеют место только в период, когда происходит процесс медленных поляризаций, т.е. при включении конденсатора.

При переменном напряжении $I_{абс}$ имеет место, если время релаксации процесса медленных поляризаций меньше или соизмеримо с полупериодом приложенного напряжения ($\tau = T/2$). В этом случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике под воздействием на него электрического поля, т.е. диэлектрические потери, обуславливаемые токами $I_{ск}$ и $I_{абс}$, наблюдаются в течение всего времени воздействия приложенного напряжения.

На векторной диаграмме токов, протекающих через конденсатор с диэлектриком при переменном напряжении (рис. 4.16, б), емкостной ток I_c опережает напряжение U по фазе на угол 90° и поэтому не создает потерь мощности в диэлектрике. Ток абсорбции $I_{абс}$ определяется поляризациями, процесс установления которых связан с потерями энергии. Поэтому он имеет реактивную $I_{ра}$ и активную $I_{аа}$ составляющие. Сквозной ток $I_{ск}$ совпадает по фазе с приложенным напряжением. Суммарный ток имеет реактивную $I_p = I_c + I_{ра}$ и активную $I_a = I_{аа} + I_{ск}$ составляющие и опережает напряжение на угол $\varphi < 90^\circ$. Угол δ , дополняющий до 90° угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи, называют *углом диэлектрических потерь*. В соответствии с векторной диаграммой токов

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p, \quad (4.10)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ - *тангенс угла диэлектрических потерь*, который является важным параметром, характеризующим качество диэлектрика при работе на переменном напряжении.

Для диэлектриков, применяемых в технике высоких частот и высоких напряжений, значение $\operatorname{tg} \delta$ не должно превышать $10^{-4} \dots 10^{-5}$. Значение $\operatorname{tg} \delta < 5 \cdot 10^{-5}$ диэлектриков, предназначенных для работы в менее ответственных условиях, допускается большим.

Если емкость конденсатора C , то реактивный ток

$$I_p = \omega UC, \quad (4.11)$$

где U - приложенное напряжение, В; ω - угловая частота, равная $2\pi f$, рад/с; f - частота приложенного напряжения, Гц.

Следовательно, активная составляющая суммарного тока

$$I_a = I_p \operatorname{tg} \delta = \omega UC \operatorname{tg} \delta. \quad (4.12)$$

Тогда мощность $P_a = UI_a$ выделяющихся в конденсаторе диэлектрических потерь

$$P_a = \omega U^2 C \operatorname{tg} \delta. \quad (4.13)$$

Подставив в формулу (4.9) значение емкости плоского конденсатора, рассчитываемой по формуле (4.5), и приняв $S = 1 \text{ м}^2$, $h = 1 \text{ м}$, получим формулу для расчета удельных диэлектрических потерь (Вт/м^3):

$$P_{a, \text{уд}} = 5,567 \cdot 10^{11} \cdot E^2 \varepsilon_r f \operatorname{tg} \delta, \quad (4.14)$$

где E - напряженность электрического поля, В/м ; $\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta = \varepsilon''$ - коэффициент диэлектрических потерь, $5,567 \cdot 10^{11} \cdot \varepsilon_r f \operatorname{tg} \delta = \sigma_a$ - проводимость диэлектрика при переменном токе частотой f , См/м .

Значение $\operatorname{tg} \delta$ на частоте 50 Гц измеряют по той же стандартной методике, которая применяется для измерения электрической емкости с помощью четырехплечего моста.

Диэлектрические потери в газообразных диэлектриках.

В слабых электрических полях диэлектрические потери в газах обуславливаются электропроводностью. Сквозной ток утечки $I_{\text{ск}}$, протекающий через конденсатор с газовым диэлектриком, мал, и $\operatorname{tg} \delta$ для такого конденсатора при 50 Гц обычно не превышает 10^{-7} .

Если диэлектрическим материалом в конденсаторе служит диэлектрик с газовыми включениями, то при росте напряжения в них начинается ионизация газа. Энергия, затрачиваемая на ионизацию, называется *потерями на ионизацию*:

$$P_{a, \text{и}} = A f (U - U_{\text{и}})^3 \quad (4.15)$$

где A - коэффициент, который зависит от размера, формы и расположения газового включения, плотности газа и диэлектрической проницаемости диэлектрика; f - частота приложенного напряжения; U - рабочее напряжение; $U_{\text{и}}$ - напряжение, при котором в газовых включениях начинается ионизация.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения (рис. 1.17) называют *кривой ионизации*, а точку C - *точкой ионизации*. Если при увеличении U напряженность

электрического поля в воздушном включении достигает пробивного значения, то происходит разряд, пробой. Такие разряды в воздушном включении называют *частичными*.

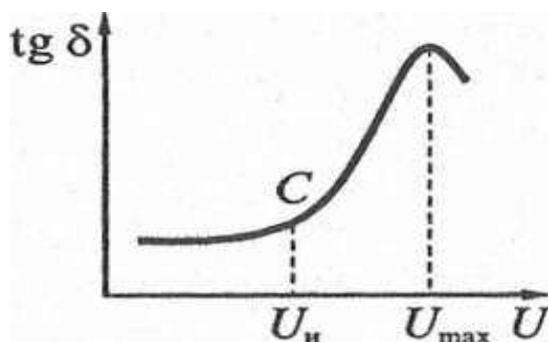


Рис. 4.17. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения для диэлектрика с газовыми включениями

Обычно изоляция электрических машин и аппаратов, кабелей и других устройств содержит воздушные включения разных размеров. Ионизация сначала возникает в крупных (большого объема) включениях и с ростом напряжения развивается в более мелких. Поэтому с ростом напряжения $\operatorname{tg} \delta$ увеличивается, достигая максимума при напряжении $U_m \approx 2U_n$. Если все воздушные включения ионизированы, то энергия на ионизацию новых включений больше не требуется и с ростом напряжения $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается.

Диэлектрические потери в жидких диэлектриках. В неполярных жидкостях диэлектрические потери вызваны электропроводностью. Поэтому $\operatorname{tg} \delta$ определяется током $I_{\text{ск}}$ (см. рис. 1.16, б), значение которого зависит от удельной проводимости σ диэлектрика. Проводимость экспоненциально увеличивается с ростом температуры [см. формулу (1.1)], также изменяется и $\operatorname{tg} \delta$ жидкого диэлектрика при нагревании (рис. 1.18, а).

С ростом частоты увеличивается емкостной ток I_c , протекающий через диэлектрик, а активный ток сквозной утечки $I_{\text{ск}}$ остается постоянным. Следовательно [см. формулу (1.9)], $\operatorname{tg} \delta$ неполярного жидкого диэлектрика с ростом частоты уменьшается (рис. 1.18, б).

В полярных жидких диэлектриках потери вызваны электропроводностью и поляризацией, которые обуславливают значения токов $I_{\text{ск}}$ и $I_{\text{абс}}$ (см. рис. 1.16,б).

При низких температурах вязкость диэлектрика так велика, что диполи «заморожены», не ориентируются в электрическом поле и дипольная поляризация не происходит. Проводимость диэлектрика при низких температурах мала, поэтому малы $I_{\text{ск}}$ и вызываемые им диэлектрические потери. Значение $\text{tg}\delta$ жидкого полярного диэлектрика при низких температурах невелико (рис. 1.18, а, штриховая кривая).

С ростом температуры вязкость диэлектрика уменьшается, время релаксации полярных молекул становится меньше и они вовлекаются в процесс поляризации. Ориентация (поворот молекул в поле в результате преодоления межмолекулярных сил) происходит с «трением». На работу против сил трения затрачивается энергия электрического поля, которая и рассеивается в диэлектрике, активная составляющая $I_{\text{аа}}$ тока абсорбции $I_{\text{абс}}$ увеличивается и $\text{tg}\delta$ диэлектрика растет (см. рис. 1.18, а). При температуре T_{max} вязкость диэлектрика уменьшается до такого значения, при котором $\tau = T/2$. Полярные молекулы в течение одного полупериода поворачиваются на максимальный угол, а в течение другого полупериода, когда направление электрического поля противоположно, ориентируются также в другом направлении. Таким образом, полярная молекула, непрерывно следуя за изменением электрического поля, поворачивается на максимальный угол, диэлектрические потери и $\text{tg}\delta$ достигают максимума.

При последующем росте температуры вязкость снижается еще больше и время τ становится меньше полупериода $\tau < T/2$. Диэлектрические потери, которые возникают только в течение времени ориентации диполя, за полупериод приложенного напряжения уменьшаются. Начинает сказываться дезориентирующее действие теплового движения, расстраивающего

ориентацию полярных молекул в поле. В результате при $\tau \ll T/2$ $\text{tg} \delta$ уменьшается до малых значений.

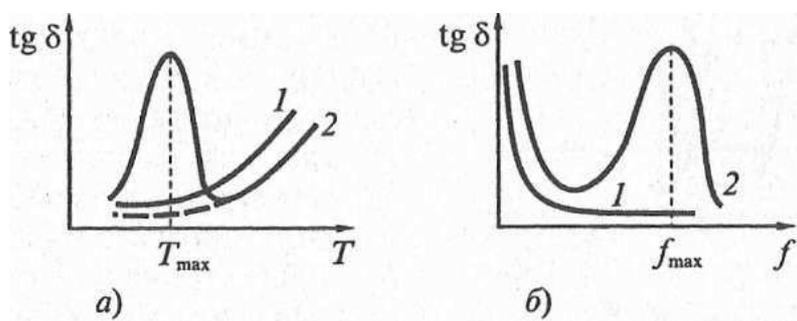


Рис. 4.18. Зависимости $\text{tg} \delta$ неполярного (1) и полярного (2) диэлектрика от температуры (а) и частоты (б)

Дальнейшее изменение температуры приводит к заметному увеличению σ диэлектрика, а поэтому к росту $I_{\text{ск}}$, который определяет на этом участке диэлектрические потери и $\text{tg} \delta$

Если потери измерять на другой, большей частоте, то максимум $\text{tg} \delta$ наблюдается при более высокой температуре. Для того чтобы на большей частоте (при меньшем полупериоде) соблюдалось равенство $\tau = T/2$, необходимо уменьшить τ , чего можно достигнуть нагреванием диэлектрика до большей температуры (рис. 4.19). На низких частотах диэлектрические потери в полярных жидких диэлектриках в основном определяются электропроводностью, то есть не изменяющимся с частотой током $I_{\text{ск}}$. Диэлектрические потери, вызываемые током $I_{\text{абс}}$, в этом случае намного меньше, так как число поворотов диполей в единицу времени еще мало. С увеличением частоты реактивный ток $I_{\text{р}}$ растет, а $\text{tg} \delta$ уменьшается, как у неполярных диэлектриков (см. рис. 1.18, б).

С увеличением частоты число поворотов полярной молекулы в единицу времени растет, и диэлектрические потери, вызванные током

$I_{\text{абс}}$, увеличиваясь, становятся намного большими, чем потери от электропроводности. Растет и $\text{tg} \delta$, достигая максимума при частоте f_m , где $T/2 = \tau$ (см. рис. 1.18, б). На этой частоте полярные молекулы, следуя за изменением электрического поля, непрерывно поворачиваются на максимальный угол. Далее, на частотах, где $T/2 \ll \tau$, времени для поворота молекулы недостаточно, $I_{\text{абс}}$ уменьшается, а $\text{tg} \delta$ становится малым.

При нагревании образца максимум $\text{tg} \delta$ сдвигается в область больших частот (рис. 4.20). При этом τ уменьшается, и для того, чтобы выполнялось равенство $T/2 = \tau$, необходимо увеличить приложенного напряжения.

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках. В неполярных твердых диэлектриках диэлектрические потери вызваны электропроводностью, а в полярных - электропроводностью и дипольной поляризацией.

Выше отмечалось, что в твердых диэлектриках дипольная поляризация представляет собой деформацию в электрическом поле звеньев, сегментов в молекулах или ориентацию полярных групп, радикалов молекул. Изменение $\text{tg} \delta$ от температуры и частоты для твердых неполярных и полярных диэлектриков такие же, как и для жидких (см. рис. 1.18...1.20).

В процессе тепловой ионной поляризации твердых диэлектриков перемещение слабосвязанных ионов в электрическом поле происходит с потерями энергии. В некоторых диэлектриках с неплотной упаковкой объема частицами, например стеклах, где имеет место ионно-релаксационная поляризация, также наблюдаются закономерности изменения $\text{tg} \delta$ от температуры и частоты, характерные для дипольной поляризации. На рис. 1.21 приведены температурные и частотные зависимости $\text{tg} \delta$ алюмоцинкосиликатного стекла - ситалла на основе оксидов SiO_2 , Al_2O_3 и ZnO . Существование или отсутствие максимумов $\text{tg} \delta$ в температурной и частотной зависимостях (см. рис. 1.21) зависит от условий термообработки стекла.

Увеличение $\text{tg}\delta$ при нагревании стекла или поликристаллического диэлектрика - керамики - может также вызываться увеличением проводимости материала и ростом числа слабосвязанных ионов, участвующих в ионно-релаксационной поляризации. В таких диэлектриках $\text{tg}\delta$ с увеличением температуры растет, но максимальное его значение при измерениях не фиксируется (рис. 1.22).

Диэлектрические потери в сегнетоэлектриках определяются электропроводностью и доменной поляризацией. Изменения $\text{tg}\delta$ от температуры и частоты в этом случае такие же, как и у твердых полярных диэлектриков.

Диэлектрические потери в композиционных диэлектрических материалах определяются свойствами компонентов и их взаимным расположением, т.е. строением материала.

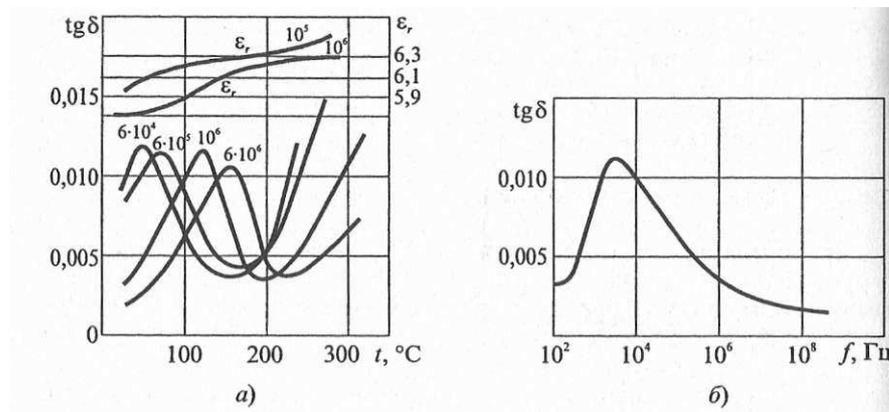


Рис. 4.21. Зависимости ϵ_r и $\text{tg}\delta$ от температуры на разных частотах (а) и $\text{tg}\delta$ от частоты (б) для ситалла на основе оксидов (по М.Д.Машкович)

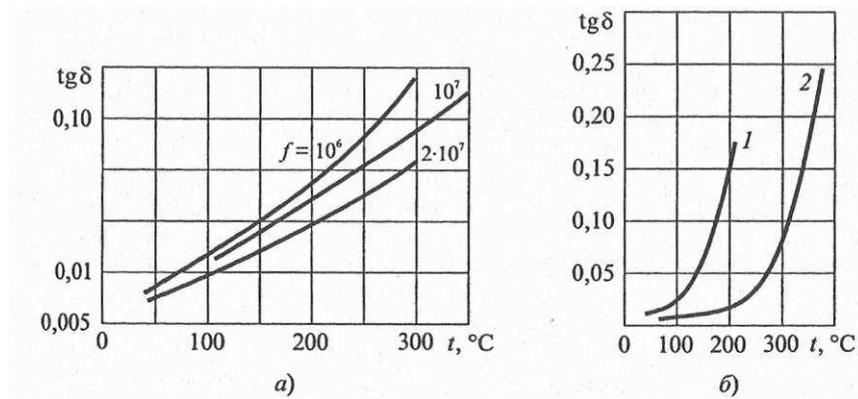


Рис. 4.22. Зависимости $\text{tg } \delta$ от температуры: а - для алюмоборосиликатного стекла Na-Ba-Mg на разных частотах (по Р.Я.Ходаковской); б - для высоковольтного фарфора (1) и стеатита (2) (по Х.С.Валееву)

Часто композиционные материалы представляют собой последовательно расположенные слои диэлектриков. Для двухслойного (двухкомпонентного) диэлектрика, где v - объемная концентрация первого компонента,

$$\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_1^v \cdot \text{tg } \delta_2^{1-v}. \quad (4.17)$$

$$\text{tg } \delta = \frac{(1-v) \text{tg } \delta_2 \varepsilon_{r1} + v \text{tg } \delta_1 \varepsilon_{r2}}{(1-v) \varepsilon_{r1} + v \varepsilon_{r2}}. \quad (4.16)$$

1.6. Механические, термические и физико-химические свойства диэлектриков

Механические свойства диэлектриков. Они характеризуют способность диэлектрика выдерживать внешние статические и динамические нагрузки без недопустимых изменений первоначальных размеров и формы. Статическая нагрузка на материал при эксплуатации или испытаниях плавно возрастает с обусловленной скоростью, динамическая воздействует мгновенно, рывком, ударом, быстро изменяясь по силе и (или) направлению.

Способность диэлектрика выдерживать статические нагрузки характеризуется разрушающим напряжением при растяжении, сжатии или изгибе, пределом текучести, относительным удлинением при разрыве, относительной деформацией при сжатии и другими характеристиками. Перечисленные параметры определяются стандартными методами.

Для испытаний используют образцы определенной формы и размеров. Например, *прочность на разрыв* тонких листов бумаги и картона определяют на образцах в виде полосок шириной 15 мм (для бумаги) или 50 мм (для картона), длиной 180 или 100 мм. При статических испытаниях анизотропных листовых материалов образцы вырезают вдоль и поперек рулона; образцы, вырезанные вдоль рулона, имеют большее разрушающее напряжение и меньшее относительное удлинение при растяжении по сравнению с образцами, вырезанными поперек рулона.

Для пластмасс важным параметром является *сопротивление раскалывания*, для определения которого используют образцы в виде бруска с размерами 15x15x10 мм. В ходе испытаний в торец образца, размещенного на нижней опорной плите разрывной машины, вдавливается клин, укрепленный на верхней плите.

Сопротивление раскалывания

$$S_p = F/b \quad (4.26)$$

где F - наибольшая нагрузка в момент раскалывания образца, Н; b - ширина средней части образца, м.

Механические свойства гибких материалов (бумаги, лакотканей, пленок) характеризуются таким условным параметром, как *стойкость к надрыву*. Для его определения используют полоску материала шириной от 8 до 20 мм, которую пропускают в закрепленную в верхнем зажиме разрывной машины скобу, перегибают на 180° , затем оба конца полоски закрепляют в нижнем зажиме. Скоба имеет форму полукольца. В зависимости от ширины полоски

радиус полукольца может иметь размеры от 5 до 13 мм. Таким образом, при натяжении полоски наибольшие усилия передаются на ее края. Стойкость к надрыву численно равна нагрузке в ньютонах, при которой происходит надрыв края в полоски.

В большинстве случаев при определении *твердости электроизоляционных материалов* используется статический метод вдавливания индентера в поверхность образца при заданной нагрузке. Обычно индентер представляет собой полированный шарик из закаленной стали с диаметром 5 мм. Твердость H (Н/м^2) определяется глубиной вдавливания индентера по истечении 30 с после нагружения:

$$H = F/(\pi dh) \quad (4.27)$$

где F -нагрузка, Н; d -диаметр шарика, мм; h - глубина вдавливания, мм.

Способность диэлектрика выдерживать динамические механические нагрузки характеризуют *ударной вязкостью* и *стойкостью к вибрации*. Удельная ударная вязкость $W_{\text{уд}}$ - это отношение энергии удара (работы удара $A_{\text{уд}}$) при изломе образца к площади его поперечного сечения S : $W_{\text{уд}} = A_{\text{уд}}/S$ (Дж/м^2 или Нм). Она характеризует прочность материала при динамическом изгибе. В таком режиме работают многие узлы электротехнического оборудования, выполненные из пластмасс, слоистых пластиков и других материалов.

Стойкость материалов и изделий к вибрациям определяется отсутствием механических повреждений, нарушением герметичности в случае герметизированных конструкций, сохранением в заданных пределах электрических параметров изоляции после воздействия в течение определенного времени вибрации с заданными параметрами (амплитудой, ускорением, диапазоном частот и др.). Для вибрационных испытаний материалов и изделий используются специальные вибрационные стенды.

Для многих электроизоляционных материалов важным параметром является *гибкость*, которая обеспечивает сохранение высоких механических и электрических параметров изоляции при самых разнообразных механических деформациях. Методы определения гибкости основаны на определении числа перегибов тонкого материала, вызывающих его разрушение. Гибкость определяется с помощью приборов, называемых *эластометрами*.

Для испытаний используют образец в виде полоски 25x200 мм, которую располагают вертикально и зажимают между двумя парами губок. Верхняя пара губок может поворачиваться на заранее установленный угол. К нижней паре губок подвешивается чашка с грузом. Гибкость определяется числом двойных перегибов, которые вызывают разрыв образца. При определении гибкости лаковых пленок тонкую медную фольгу с нанесенной лаковой пленкой изгибают вокруг стержней разных диаметров. Показателем гибкости служит наименьший диаметр стержня, при изгибе вокруг которого пленка еще не растрескивается.

Термические свойства диэлектриков. Поведение диэлектрика при нагревании характеризуется рядом свойств, которые в совокупности определяют его допустимую рабочую температуру. К важнейшим термическим свойствам материала относятся теплопроводность, теплоемкость, плавление и размягчение материала, тепловое расширение, нагревостойкость, стойкость к термоударам.

Теплопроводность определяет процесс отвода теплоты от нагретых проводников и магнитопроводов через слой электрической изоляции, а также отвод теплоты из толщи электрической изоляции, нагретой за счет диэлектрических потерь.

Теплопроводность характеризуется *коэффициентом теплопроводности* λ [Вт/(м·К) или Вт/(м·°С)], который равен количеству теплоты, прошедшей через единицу площади при градиенте температуры 1 К/м. Как правило,

диэлектрики являются плохими проводниками теплоты, и λ их мал. Так, для газов $\lambda = (2...5) \cdot 10^{-2}$, для твердых диэлектриков $\lambda = (0,02...3,0)$ Вт/(м·К).

Теплоемкость C [Дж/(кг·К)] вещества определяет то количество теплоты Q , которое необходимо для нагревания тела с массой m , от температуры T_0 до T , и входит в уравнение $Q = Cm(T - T_0)$. Время нагревания или охлаждения электроизоляционных конструкций зависит от теплоемкости используемых в них материалов. Теплоемкость определяет количество теплоты, необходимой для их нагревания в ходе технологий изготовления и целого ряда других процессов. Удельная теплоемкость некоторых диэлектриков при нормальных температурах имеет значения (Дж/(кг·К)): 300... 1000 для щелочных и алюмосиликатных стекол; 800...900 для электротехнического фарфора и стеатита; 1200...2200 для органических полимеров; 1800... 2500 для нефтяных электроизоляционных масел; 4200 для воды.

Твердые кристаллические диэлектрики при нагревании плавятся и для них характерным параметром является *температура плавления* $T_{пл}$ (К). Аморфные материалы переходят из твердого состояния в жидкое в интервале температур. Такой переход характеризуют температурой *размягчения* $T_{разм}$. Температуру размягчения таких диэлектриков, как битум, воск и некоторых видов компаундов определяют по специальной методике.

Температура размягчения ряда жестких пластмасс определяется по Вику. Образец нагревают в термостате и одновременно подвергают воздействию сжимающего усилия. Усилие создается нагрузкой 10 или 50 Н и передается на образец через стержень и индентер в виде трубочки с диаметром 1,13 мм и длиной 3 мм. За $T_{разм}$ жестких пластмасс принимают температуру, при которой индентер внедряется в образец на глубину 1 мм. Температура размягчения пластмасс и других материалов определяется также при одновременном воздействии температуры и изгибающей нагрузки на образец. Так определяют $T_{разм}$ по Мартенсу. Стандартом предусмотрено определение $T_{разм}$ по прогибу расположенного горизонтально на двух опорах

стержня из диэлектрика под действием нагрузки, которая прикладывается к середине стержня. Стержень имеет размеры 110x 10x4 мм. За $T_{разм}$ принимают температуру, при которой прогиб составляет 0,33 мм.

Диэлектрик, как и другие материалы, при нагревании расширяется. Термическое расширение оценивают температурным коэффициентом длины $\alpha_{TKl} = 1/l \cdot dl/dT$ (K⁻¹), и температурным коэффициентом объема $\alpha_{TKV} = 1/V \cdot dV/dT$ (K⁻¹). Температурный коэффициент объема равен утроенному температурному коэффициенту длины: $\alpha_{TKV} = 3\alpha_{TKl}$. Значение α_{TKl} большинства диэлектриков изменяется в пределах (0,3...20)·10 K⁻¹. Весьма мал α_{TKl} кварцевого стекла (0,055·10⁻⁵ K⁻¹), поэтому изделия из него не разрушаются при резких перепадах температур. В композиционном электроизоляционном материале, состоящем из диэлектриков с разными α_{TKl} , при нагревании или охлаждении возникают внутренние механические напряжения. При многократном повторении цикла «нагревание - охлаждение» в таких материалах образуются трещины, расслоения и другие механические повреждения, сопровождаемые резким снижением их электрических параметров.

Для жидких и аморфных вязких материалов (смол, компаундов) важным параметром является *вязкость*. Вязкость свойственна текучим телам, где имеет место сопротивление перемещению одной части (одного слоя) тела относительно другой. Это сопротивление характеризуется *динамической вязкостью* (Па·с) и *кинематической вязкостью* (м²/с), равной отношению динамической вязкости к плотности материала.

Пользуются и *условной вязкостью* (ВУ), которая связана с динамической и кинематической эмпирическими соотношениями. Условная вязкость измеряется с помощью вискозиметров разных типов. С помощью капиллярных или универсальных вискозиметров ВУ измеряется по времени истечения заданного объема жидкости через капилляр или сопло заданного диаметра.

Вязкость определяет электрические свойства электроизоляционных материалов и такие технологические процессы производства электрической изоляции, как пропитка твердых материалов лаками, компаундами, прессование материалов и изделий из них. Вязкость минерального масла определяет конвекционный теплоотвод от нагретых частей в окружающую среду в масляных трансформаторах, выключателях и других устройствах.

В процессе эксплуатации материалы и изделия из них подвергаются воздействию различных старящих факторов. К ним относятся нагревание и электрическое напряжение. Одновременно могут воздействовать влажность, химически активные вещества, радиация, механические нагрузки, в том числе вибрационные, глубокое охлаждение и целый ряд других. Способность электрической изоляции без повреждения и недопустимого ухудшения важных для нее свойств выдерживать действие одного или нескольких факторов в течение времени, сравнимого со сроком эксплуатации, определяет ее стойкость к воздействию таких факторов.

Нагревостойкость электрической изоляции определяется по изменениям ее $E_{пр}$, $tg\delta$, потере массы, механической прочности, а также другим параметрам в процессе выдержки при повышенных по сравнению с рабочей температурах. Например, при температуре размягчения сильно снижается механическая прочность диэлектрика, и деформация изделий увеличивается до опасных пределов, они выходят из строя. Поэтому оценкой нагревостойкости материала может служить $T_{разм}$ по Мартенсу. Критерием выхода изоляции из строя может служить также уменьшение ее $E_{пр}$ вдвое по сравнению со значением до испытаний. Показателем нагревостойкости может быть также время выхода из строя всех образцов при каждой температуре испытаний.

Материалы, используемые в изоляции электрических машин, трансформаторов и аппаратов, по нагревостойкости разделяют на семь классов. Для каждого класса устанавливается определенная максимальная

температура, при которой материал может длительно работать без ухудшения свойств (табл. 1.2).

Класс нагревостойкости для электроизоляционных материалов или их сочетаний (систем изоляции) определяют на основе опыта эксплуатации или испытаний, показывающих пригодность этих материалов для работы при температуре, соответствующей данному классу.

Изоляция целого ряда электротехнического и радиоэлектронного оборудования должна сохранять свои свойства при охлаждении до температуры $-(60...70)^{\circ}\text{C}$, а в ряде случаев и при температуре жидкого азота (-196°C), водорода (-252°C) и гелия ($-268,7^{\circ}\text{C}$). При низких температурах электрические свойства диэлектриков, как правило, улучшаются. Но механические свойства эластичных и гибких в нормальных условиях материалов при низких температурах изменяются; они становятся жесткими, хрупкими и легко разрушаются, особенно при вибрациях.

Холодостойкость электрической изоляции определяется в результате сравнения механических характеристик при отрицательной и нормальной температурах. Например, измеряют деформации при растяжении при низкой l_2 и при нормальной l_1 температурах, возникающие под действием одинакового усилия и рассчитывают коэффициент холодостойкости $K_{\text{хол}} = l_2/l_1$.

Холодостойкость опре

деляется предельно низкой температурой, при которой остается постоянным. $T_{\text{хол}} K_{\text{хол}}$

Стойкость к термоударам определяется для хрупких материалов и изделий из них. Например, изоляторы из электротехнического фарфора должны выдерживать трехкратное нагревание без заметного ухудшения основных свойств. При определении стойкости к термоударам нагретые изоляторы погружаются в ледяную воду, где выдерживаются определенное время. После выдержки изоляторы кондиционируются на воздухе при комнатной температуре. Далее цикл «нагревание - охлаждение» повторяют.

После трех циклов изоляторы кондиционируются и подвергаются электрическим испытаниям.

Таблица 4.2

Класс	Температура, характеризующая класс, К (°С)	Основные группы электроизоляционных материалов, соответствующие данному классу
Y	363 (90)	На основе целлюлозы, непропитанные хлопчатобумажные и шелковые ткани, бумага и картон, поливинилхлорид, вулканизированный натуральный каучук
A	378 (105)	Те же материалы, но пропитанные лаками или погруженные в электроизоляционную жидкость, предохраняющую от доступа кислорода
E	393 (120)	Пластмассы на основе фенольно-формальдегидных смол, лавсановые пленки, эпоксидные, полиэфирные и полиуретановые смолы, изоляция эмальпроводов на таких смолах
B	403 (130)	Щепаная слюда на подложке из бумаги, асбестовые и стекловолокнистые материалы, стеклоткани, миканиты на фенольно-формальдегидных смолах, эпоксидные компаунды с неорганическими наполнителями
F	428 (155)	Слюдяные продукты, изделия из стекловолокна без подложки или с неорганической подложкой со связующими веществами на основе эпоксидных, термореактивных полиэфирных и кремнийорганических смол
H	453 (180)	Материалы класса F, изготовленные с применением кремнийорганических смол особо высокой нагревостойкости
C	> 453 (180)	Чисто неорганические материалы без склеивающих и пропитывающих органических веществ, слюда, стекло и стеклоткани, асбест, микалекс, миканиты, фторолон-4, полиамиды

Физико-химические свойства диэлектриков. Электроизоляционные материалы имеют различную стойкость к разрушению (коррозии) при контактировании с водой, кислотами, щелочами, солевым» растворами, маслами, топливом, газами. При определении *химстойкости* образцы длительное время выдерживаются в условиях, наиболее близких к эксплуатационным, после чего определяют изменение их внешнего вида, массы, электрических и других параметров. Например, в нефтяных маслах при эксплуатации происходит коррозия погруженных в масло изоляции и металлов, в процессе которой образуются кислоты, и масло стареет. Кислоты содержатся и в плохо очищенных маслах. Количество кислоты в масле характеризуется *кислотным числом*, равным количеству граммов едкого кали (KOH), необходимого для нейтрализации всех свободных кислот, содержащихся в 1 кг испытуемого материала.

Влагостойкость диэлектрика определяется его способностью сорбировать влагу из окружающей среды (влажного воздуха). В процессе выдержки во влажной атмосфере контролируют изменение таких параметров диэлектрика, как ρ , E_{np} , $\text{tg } \delta$, сопротивление изоляции изделия $R_{из}$ и другие. Параллельно определяют влагопоглощение образца, %:

$$w_a = 100 (m_t - m) / m, \quad (4.28)$$

где m - начальная масса образца, m_t - масса образца после его выдержки в течение времени t во влажной атмосфере.

Водостойкость и *водопоглощение* определяются по изменению таких же параметров диэлектрика в процессе выдержки его в дистиллированной воде.

Под действием ионизирующих излучений (ИИ) могут происходить необратимые изменения структуры диэлектрика, которые называют *радиолизом*. В полимерах радиолиз приводит к *структурированию* - образованию связей между молекулами, а также и к *деструкции* - разрушению молекул. В результате изменяются физико - химические

свойства полимеров (температура плавления кристаллических полимеров, термопластичность, химическая стойкость, растворимость), механические свойства (разрушающее напряжение, модуль упругости, хрупкость), электрические свойства (E_{np} , ρ , ρ_s).

Радиолиз керамических диэлектриков происходит в результате поглощения значительно больших доз ИИ. В процессе действия ИИ контролируются изменения прежде всего механических свойств диэлектрика. Во многих случаях необратимые изменения механических свойств определяют изменения электрических свойств.

Тропикостойкость диэлектрика определяется по изменению ρ , $\text{tg } \delta$, E_{np} и механической прочности, а также других параметров под воздействием тропических климатических факторов. Для районов с тропическим влажным или сухим климатом, с тропическим морским климатом характерными являются следующие факторы: холод, жара, влага, солнечная радиация, атмосфера, загрязненная морской солью, пустынной или степной пылью, песком, пеплом, химическими соединениями; воздействие микроорганизмов - плесневых грибов, бактерий, вредителей животного мира - термитов, муравьев, тараканов, грызунов и других представителей фауны.

1.7. Газообразные диэлектрики

Преимуществами газов перед остальными видами диэлектрических материалов являются высокое удельное сопротивление, малый тангенс угла диэлектрических потерь, малая (близкая к единице) диэлектрическая проницаемость. Наиболее важным свойством газов является их способность восстанавливать электрическую прочность после разряда.

Кроме воздуха в качестве электрической изоляции широко используют двух- и трехатомные газы - азот, водород, углекислый газ. Электрические прочности этих газов при нормальных условиях мало отличаются друг от

друга и могут с достаточной точностью приниматься равными прочности воздуха.

Лучше всего требованиям к газам, применяемым в электроизоляционных конструкциях, удовлетворяют элегаз SF_6 и фреон CCl_2F_2 . Гексафторэтан нельзя использовать при повышенных давлениях из-за низких критических параметров ($P_{кр} = 3,3$ МПа, $T = -24^\circ C$).

Азот имеет с воздухом одинаковую электрическую прочность и часто применяется вместо него для заполнения газовых конденсаторов и других целей, так как не содержит кислорода, оказывающего окисляющее воздействие на соприкасающиеся с ним материалы.

Значительный интерес представляет водород, имеющий весьма высокий коэффициент теплопроводности, несмотря на его меньшую электрическую прочность по сравнению с воздухом. Водород применяется в качестве электроизоляционной и охлаждающей среды в крупных турбогенераторах.

Элегаз, или гексафторид серы (SF_6), имеет электрическую прочность примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха. Поскольку элегаз обладает низкой температурой кипения и высокой плотностью, примерно в 5,1 раза тяжелее воздуха, он может быть сжат до давления 2 МПа без сжижения. Элегаз нетоксичен, химически стоек, не разлагается при нагревании до температуры $800^\circ C$.

Применение элегаза в силовых трансформаторах целесообразно в тех случаях, когда имеют место особые требования пожаробезопасности. В небольших количествах такие трансформаторы эксплуатируются в Японии. В США были созданы отдельные образцы трансформаторов с применением принудительной циркуляции элегаза, однако в этом случае усложняется конструкция трансформатора и снижается надежность его работы.

В высоковольтной технике находят применение инертные газы, например гелий, который используется как добавка к высокопрочным сжатым газам для повышения их дугогасительной способности.

1.8. Жидкие диэлектрики

Жидкие диэлектрики предназначаются для пропитки электрической изоляции трансформаторов, конденсаторов, кабелей с целью повышения ее электрической прочности и отвода тепла в процессе конвекции, для дугогашения в масляных выключателях, заливки маслonaполненных вводов, реакторов, реостатов и других электроаппаратов.

По химической природе жидкие диэлектрики принято разделять на нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное, кабельное) и синтетические жидкости (хлорированные и фторированные углеводороды, кремний или фтороорганические жидкости и некоторые другие).

Нефтяные масла. Они получаютcя фракционной перегонкой нефти. Выделенные фракции представляют собой сложную смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматического рядов с небольшой примесью других компонентов, содержащих атомы серы, кислорода и азота. Нефтяные масла, в которых преобладают нафтеновые углеводороды, называют *нафтеновыми*. Среди трансформаторных масел на их долю приходится 75...80%. Необходимой составной частью электроизоляционных нефтяных масел являются также ароматические углеводороды, содержание которых ограничивается определенным оптимальным значением (обычно 10... 12%), обеспечивающим наибольшее увеличение срока службы. Излишнее количество ароматических углеводородов увеличивает тангенс угла диэлектрических потерь.

Чтобы получить трансформаторное масло, пригодное для применения, необходимо очистить масляный дистиллят, который остается после отгонки от нефти легких нефтепродуктов: бензина, керосина, лигроина.

Дистиллят очищают серной кислотой, затем нейтрализуют щелочью, промывают водой и сушат при температуре 75...85°C, продувая через него воздух. Для очистки от примесей и механических загрязнений масла фильтруют через адсорбенты - вещества, имеющие сильно развитую поверхность.

Свежее трансформаторное (конденсаторное) масло имеет обычно соломенно-желтый цвет, причем чем глубже очистка, тем светлее масло. Масла, бывшие в эксплуатации, из-за накопления продуктов окисления имеют темный цвет.

Конденсаторное масло получают из высококачественной нефти или в результате дополнительной очистки адсорбентами трансформаторного масла. Операцию очистки конденсаторного масла кислотой и щелочью проводят также, как и для трансформаторного, но более длительно и тщательно.

Так как нефтяные электроизоляционные масла являются горючими жидкостями, то они представляют собой большую пожарную опасность в масляных хозяйствах энергосистем, где часто используются тысячи тонн масла. Поэтому правила пожарной безопасности при работе с маслонаполненным оборудованием должны тщательно соблюдаться. Пожарная опасность оценивается по температуре вспышки паров трансформаторного масла в смеси с воздухом, которая не должна быть ниже 135...140°C. В тех случаях, когда трансформаторное масло применяется в масляных выключателях высокого напряжения, важным параметром масла является температура застывания. Масло в этих электрических аппаратах служит для охлаждения канала дуги и быстрого ее гашения в момент размыкания контактов.

Обычное трансформаторное масло имеет температуру застывания примерно -45 °C, а специальное «арктическое» масло, предназначенное для

работы на открытых подстанциях в районах Крайнего Севера, имеет температуру застывания -70°C (марка АТМ-65).

Наиболее важные для применения трансформаторного масла свойства нормированы стандартом. Важной характеристикой является кинематическая вязкость при температуре 20 и 50°C , так как при увеличении вязкости сверх допустимых пределов хуже отводится теплота от обмоток и магнитопровода трансформатора, что может привести к сокращению срока службы электрической изоляции.

Стандартом нормировано также кислотное число. Этот показатель важен для учета старения масла в процессе его эксплуатации и для разных марок масла не должен превышать значений 0,03... 0,1 г КОН на 1 кг. Для расчета расширителей трансформаторов, в которые переходит часть масла из бака трансформатора при повышении температуры, важно также учитывать и плотность масла, которая составляет 0,85...0,9 $\text{мг}/\text{м}^3$, и температурный коэффициент объемного расширения $0,00065 \text{ K}^{-1}$.

Способность масла отводить теплоту от магнитопровода и обмоток погруженного в него трансформатора зависит от удельной теплоемкости, равной при нормальной температуре примерно 1,5 Дж/(кг·К), и коэффициента теплопроводности - примерно 1 Вт/(м·К). Обе эти характеристики при росте температуры увеличиваются.

По своим диэлектрическим характеристикам хорошо очищенное от примесей и влаги трансформаторное масло обладает свойствами неполярного диэлектрика. Значение диэлектрической проницаемости при температуре окружающей среды 20°C равно 2,2...2,3, $\text{tg}\delta$ при частоте 50 Гц для трансформаторного масла не должен превышать 0,003. Значение $\text{tg}\delta$ определяется проводимостью и зависит от степени очистки трансформаторного масла. Получение масел с пониженными диэлектрическими потерями (значение $\text{tg}\delta$ примерно 0,002...0,0005) для кабелей и конденсаторов требует очень хорошей очистки с применением

адсорбентов. Зависимость $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла от температуры на частоте 50 Гц показана на рис. 1.35. Удельное электрическое сопротивление свежего трансформаторного масла при нормальной температуре не превышает 10^{13} Ом · м.

Важной характеристикой масла является его электрическая прочность, которая чрезвычайно чувствительна к увлажнению. Правила технической эксплуатации электростанций (ПТЭ) предусматривают определенные нормы электрической прочности для чистого и сухого трансформаторного масла, приготовленного для заливки в аппарат, и для масла, находившегося в эксплуатации.

Пробой масла производят в стандартном разряднике между погруженными в масло металлическими дисковыми электродами диаметром 25 мм с закругленными краями при расстоянии между ними 2,5 мм. Пробивное напряжение технически чистых масел в стандартном разряднике составляет 50... 60 кВ при частоте 50 Гц и примерно 120 кВ при воздействии импульсного напряжения. Примесь воды в масле снижает значение пробивного напряжения. Если вода находится в масле в виде эмульсии, т.е. в виде мельчайших капель, которые втягиваются в места, где напряженность поля велика, то в этом месте начинается развитие пробоя (рис. 1.36). Увеличение пробивного напряжения с ростом температуры объясняется переходом воды из суспензии в молекулярно-растворенное состояние. Рост пробивного напряжения при уменьшении температуры ниже 0°C объясняется образованием льда и ростом вязкости масла.

Для повышения устойчивости масел к процессам старения их состав подбирают таким образом, чтобы в нем не содержалось естественных катализаторов окисления и сохранялись соединения, замедляющие окисление. Такие вещества называются *ингибиторами*. В масла вводят также синтетические ингибиторы - ионол, ДВРС в концентрации от 0,1 до 0,5%. Введение ионола замедляет процесс старения масла в 2...3 раза. Чтобы

продлить срок службы масла в оборудовании, используют 1 различные методы. Наиболее распространенный способ - герметизация оборудования, в результате которой устраняется непосредственный контакт масла с кислородом воздуха. Этот прием используется в кабельной, конденсаторной технике и в трансформаторостроении. В трансформаторах для замедления накопления продуктов окисления масла используется метод естественной циркуляции масла через так называемый термосифонный фильтр, который можно периодически заменять новым, заполненным адсорбентом. Такие фильтры постоянно соединены с трансформатором. Для трансформаторов различных размеров разработано примерно 20 типов термосифонов.



Особенностью термосифонных фильтров является возможность восстановления масла в трансформаторе без его отключения. Для предотвращения окислирования и увлажнения масла в трансформаторах, свободное пространство между поверхностью масла и крышкой бака или расширителя обычно заполняется азотом.

Масла, побывавшие в эксплуатации, подвергаются регенерации. Влага и крупные твердые примеси удаляются на различных центрифугах (для электрических аппаратов напряжением ниже 35 кВ). Для электрических аппаратов напряжением выше 35 кВ масла очищаются от содержащихся в них влаги, газов и легких примесей термовакуумной обработкой в специальных аппаратах. Осушение масел производится искусственными *цеолитами*, которые известны также под названием *молекулярные сита*. Масла с кислотным числом ниже 0,4 мг КОН на 1 г подвергаются очистке природными и синтетическими адсорбентами при температуре 50...60°С.

Основные характеристики регенерированного масла должны соответствовать нормам на свежие масла.

Кроме трансформаторного масла в электротехнической промышленности находят применение другие виды нефтяных масел. К ним относятся конденсаторные, кабельные и масла для масляных выключателей и контакторных устройств регулирования напряжения под нагрузкой.

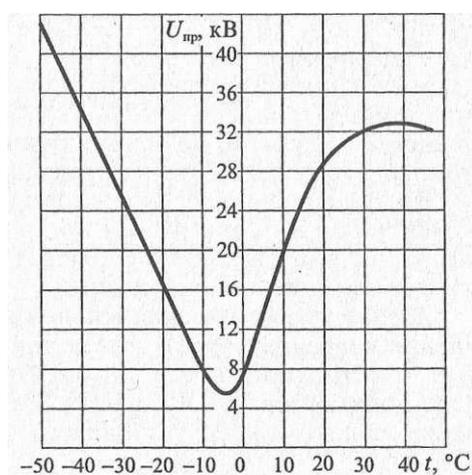


Рис. 4.36. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от температуры (масло $T = 1500$ К, содержащее 0,0040% воды при переменном напряжении)

Синтетические жидкие диэлектрики. Эти диэлектрики применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить длительную и надежную работу высоковольтных электрических аппаратов при повышенных тепловых нагрузках и напряженности электрического поля, в пожаро- или

взрывоопасной среде. Жидкие диэлектрики находят применение для заливки герметичных кожухов, в которых располагаются блоки электронной аппаратуры.

Наибольшее применение получили синтетические жидкости на основе хлорированных углеводородов, что связано с их высокой термической устойчивостью, электрической стабильностью, негорючестью, повышенным значением диэлектрической проницаемости и относительно невысокой стоимостью. Если цену нефтяного масла принять равной единице (по зарубежным данным), то стоимость хлорированных углеводородов по отношению к маслу равна 4... 10, кремнийорганических жидкостей - от 80 до 370, фторорганических жидкостей - до 1150. Однако в связи с токсичностью хлорированных углеводородов их применение сначала ограничили, а затем запретили, хотя в эксплуатации они еще имеются.

Хлорированные углеводороды можно получить хлорированием дифенила $C_6H_5 - C_6H_5$. При этом можно получать продукты с различной степенью хлорирования: три-, тетра-, пента- и гекса- хлордифенилы. По мере увеличения степени хлорирования растут молекулярная масса, плотность, вязкость, температура застывания и кипения. Возрастает и экологическая опасность, поэтому в конденсаторостроении пентахлордифенил (совол) был заменен на три- хлордифенил, хотя он имеет повышенную вязкость при низких температурах.

Для применения в силовых трансформаторах был разработан совол-10, представляющий собой смесь 90% пентахлордифенила и 10% трихлорбензола, который имеет в рабочем интервале температурную вязкость, близкую к вязкости трансформаторного масла. Однако по своим вязкостно-температурным свойствам совтол-10 значительно уступает гексолу, представляющему собой смесь 20% пентахлордифенила и 80% гексахлорбутадиена. Гексол не застывает при температуре до $-60^{\circ}C$ и меньше подвержен влиянию загрязнений. Для трихлордифенила, совтола-10

и гексола при температуре 90°C $\text{tg}\delta = 0,015 \dots 0,03$. Удельное объемное сопротивление полихлордифенилов при рабочих температурах $3 \cdot 10^9 \dots 10^{12}$ Ом м.

Наименее полярные свойства проявляются у гексола, у которого при температуре 70°C $\epsilon < 2,7 \dots 2,9$. Электрическая прочность большинства жидкостей на основе хлорированных углеводородов при температуре среды 20°C не превышает $18 \dots 22$ МВ/м.

Все жидкости на основе хлорированных дифенилов являются токсичными и биологически вредными соединениями. При их использовании необходимо соблюдать правила техники безопасности и промышленной санитарии.

По диэлектрическим свойствам фторированные углеводороды могут быть

электрических аппаратов в тех случаях, когда рабочие температуры велики для других видов жидких диэлектриков. Некоторые перфторированные жидкие диэлектрики могут использоваться для создания испарительного охлаждения в силовых трансформаторах.

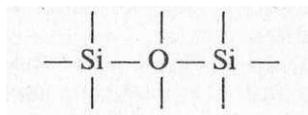
Жидкие диэлектрики на основе кремнийорганических соединений (полиорганосилоксанов). Они не токсичны и экологически безопасны. Эти жидкости представляют собой полимеры с низкой степенью полимеризации, в молекулах которых содержится повторяющаяся силоксанная группировка, атомы кремния которой связаны с органическими радикалами. В зависимости от строения радикала (метил-, этил-, фенил-), непосредственно связанного с атомом кремния, основные группы кремнийорганических жидкостей имеют название: полиметилсилоксановые (ПМСЖ), полиэтилсилоксановые (ПЭСЖ), полифенилсилоксановые (ПФСЖ), полиметилфенилсилоксановые (ПМФСЖ). Температура вспышки паров этих жидкостей нормируется не ниже 300°C, температура застывания - ниже -60°C. При температурах более высоких, чем температура вспышки паров, эти жидкости самовоспламеняются без контакта с открытым пламенем. По своим диэлектрическим характеристикам полиорганосилоксановые жидкости приближаются к неполярным диэлектрикам. Так, для полиэтилсилоксановых жидкостей $\text{tg } \delta = (2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$; $\epsilon = 2,4 \dots 2,5$;

$$\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}, U_{\text{пр}} > 45 \text{ кВ}$$

полиорганосилоксановые жидкости используют в импульсных трансформаторах, специальных конденсаторах, блоках радио- и электронной аппаратуры и в некоторых других случаях.

Жидкие диэлектрики на основе фторорганических соединений. Эти диэлектрики отличаются негорючестью, высокой химической, окислительной и термической стабильностью, высокими электрофизическими и теплопередающими свойствами. По химическому составу они представляют собой углеводороды, амины, эфиры и другие соединения, в которых атомы водорода частично или полностью замещены атомами фтора или хлора (в хлорфторорганических соединениях). Если атомы водорода полностью замещены атомами фтора, то такие соединения называются *перфторированными*. Некоторые фторуглеводороды и фторхлоруглеводороды нашли применение в качестве хладоагентов и получили название *хладонов* (раньше их называли фреонами). Некоторые сорта хладонов получили применение в качестве жидких диэлектриков.

Фторуглеводородные жидкости получили применение для заполнения небольших трансформаторов, блоков электронного оборудования и других



отнесены к неполярным соединениям. Так, для хладона-112, хладона-113, хладона-114 значение $\text{tg } \delta = 0,0001 \dots 0,0002$;

$\rho_v = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\varepsilon = 2,2 \dots 2,5$; $U_{\text{нр}} = 28 \dots 49 \text{ кВ}$ в стандартном разряднике.

Смесь хладонов с воздухом взрывобезопасна. Хладоны признаны нетоксичными соединениями, однако в помещении, заполненном их парами, возможна смерть теплокровных животных от удушья, вызванного, по видимому, недостатком кислорода. При высоких температурах хладоны разлагаются с выделением токсичных продуктов.

1.9. Электроизоляционные пластмассы

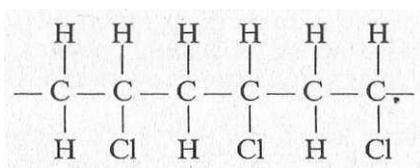
Рассмотрим электроизоляционные материалы, относящиеся к группе полимеров. Некоторые полимеры, например полистирол, поливинилхлорид, применяют непосредственно для изготовления электрической изоляции, другие используют для изготовления многочисленных электроизоляционных материалов - слоистых пластиков, резин, пластических масс, композиционных слюдосодержащих материалов и пр.

Основные определения и понятия технологии пластических масс. Для изготовления электрической изоляции используют много материалов, относящихся к группе полимеров.

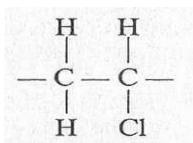
Полимеры - высокомолекулярные соединения, являющиеся основной частью пластических масс. Они связывают в единое целое другие компоненты и придают материалу определенные свойства. Полимерное вещество, следовательно, служит *связующим*. В состав *пластмасс* кроме связующего вещества могут входить наполнители, пластификаторы,

стабилизаторы, отвердители, смазывающие вещества, красители, порообразователи и другие добавки.

Полимеры имеют большую молекулярную массу. Молекулы полимеров, называемые *макромолекулами*, состоят из большого числа многократно повторяющихся структурных группировок (элементарных звеньев), соединенных в цепи химическими связями. Например, в молекуле поливинилхлорида



повторяющимся звеном является группировка



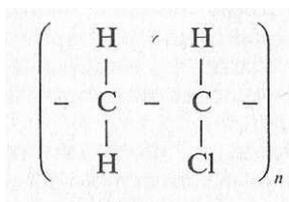
Полимеры получают из *мономеров* - веществ, каждая молекула которых способна образовывать одно или несколько составных звеньев. Так как полимеры представляют собой смеси молекул с различной длиной цепи, то под молекулярной массой полимера понимают ее среднее статистическое значение. Молекулярная масса полимеров может достигать значений в несколько миллионов.

Степень полимеризации - важная характеристика полимеров, она равна числу элементарных звеньев в молекуле. Например, структурную формулу поливинилхлорида можно записать в компактном виде:

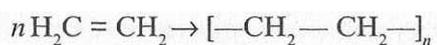
где η - степень полимеризации. Полимеры с низкой степенью полимеризации называют *олигомерами*.

Полимеризацией называют реакцию образования полимера из молекул мономера без выделения низкомолекулярных побочных продуктов. При этой реакции в мономере и элементарном звене полимера соблюдается одинаковый элементный состав.

Наиболее распространенной разновидностью реакции полимеризации является цепная полимеризация, при которой макромолекула образуется по



цепному механизму путем последовательного присоединения молекул мономеров к растущей цепи. Соединения с двойными связями, как правило, полимеризуются по цепному механизму. Примером реакции полимеризации является полимеризация этилена:



Поликонденсация - реакция образования полимера из мономеров с выделением низкомолекулярных веществ (воды, спирта и др.) Элементный состав полимерной молекулы отличается от элементного состава полимерной молекулы.

Реакция поликонденсации протекает, если мономерные соединения содержат химически активные группы, способные вступать во взаимодействие. Реакция поликонденсации лежит в основе получения важнейших полимеров, таких, как феноло-формальдегидные смолы, полиэфирные и др. Термином *смола* в промышленности иногда пользуются наряду с названием *полимер*.

Полимеры делят на линейные и пространственные в зависимости от структуры макромолекул. В *линейных* полимерах макромолекулы состоят из последовательности повторяющихся звеньев с большим отношением длины молекулы к ее поперечным размерам. Макромолекулы *пространственных* полимеров связаны в общую сетку.

Термопластичные полимеры (термопласты) получают на основе полимеров с линейной структурой макромолекул. При нагревании они размягчаются, а при охлаждении затвердевают. При этом процессе не происходит никаких химических изменений. Для электрической изоляции термопласты применяются в основном в форме нитей или пленок, получаемых из расплавов. Способность к формованию и растворению в подходящих по составу растворителях сохраняется у них при повторном нагревании.

Терморезистивные полимеры получают из полимеров, которые при нагревании или при комнатной температуре вследствие образования пространственной сетки из макромолекул (отвердевания) переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. Этот процесс является необратимым.

На свойства полимеров влияет не только их химический состав и строение, но также и физическая структура вещества. В полимерах с регулярной структурой макромолекул, т.е. когда имеется определенный порядок в чередовании элементарных звеньев, возможно наличие кристаллических областей, характеризующихся строго определенным пространственным расположением цепей и одновременно элементарных звеньев макромолекул. В *аморфных* полимерах отсутствует дальний порядок в расположении макромолекул. Линейные аморфные и кристаллизующиеся полимеры могут находиться в стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем физических состояниях.

В *стеклообразном* состоянии полимеры обладают хрупкостью. Температура, при которой в процессе нагревания полимер приобретает

эластичность, называют температурой стеклования (T_c). При более высоких температурах материалы обладают большой упругой деформацией и находятся в высокоэластичном состоянии. Полимеры, находящиеся в высокоэластичном состоянии в широком интервале температур, называются *эластомерами* или *каучуками*. Если нагревать полимер, находящийся в высокоэластичном состоянии, до температуры текучести, то материал переходит в вязкотекучее состояние. В этом состоянии материал обладает необратимыми пластическими деформациями. Все перечисленные стадии материал проходит при понижении температуры. Обычно эти физические состояния выявляют по зависимости деформации от температуры (рис. 4.37).

Кристаллические полимеры обычно содержат кристаллическую и аморфную фазы. Многие свойства полимеров зависят от соотношения аморфной и кристаллической фаз - *степени кристалличности*.

Пластмассы находят применение в электротехнике как электроизоляционные и конструкционные материалы. По составу в большинстве случаев пластмассы представляют собой композиции из связующего вещества и наполнителя. В качестве связующего вещества используют наиболее часто полимерные материалы, способные деформироваться под воздействием давления. Они связывают в единое целое другие компоненты и придают материалу характерные свойства. Иногда применяется и неорганическое связующее вещество, например стекло в микалексе, цемент в асбоцементе. *Наполнители* используются для улучшения прочностных свойств, уменьшения усадки, повышения стойкости к воздействию различных сред, а также для снижения стоимости. Наполнители подразделяются на органические и неорганические, а каждая из групп - на порошкообразные и волокнистые. К органическим порошкообразным наполнителям относятся древесная мука, дисперсные полимеры, к органическим волокнистым - хлопковые очесы, сульфитная целлюлоза, бумажная крошка, синтетические волокна.

К неорганическим порошкообразным наполнителям относятся молотая слюда, кварцевая мука, асбест, тальк, каолин, стекловолокно и др.

Кроме связующих и наполнителей применяют *пластификаторы* для улучшения технологических и эксплуатационных свойств пластмасс. Пластификаторы также увеличивают холодостойкость пластмасс и устойчивость их к воздействию ультрафиолетового излучения. В некоторых пластмассах содержание пластификатора может достигать 30...40%. На определенных стадиях переработки в пластмассы добавляют *сшивающие реагенты*, различные *инициаторы полимеризации* в сочетании с *ускорителями* и *активаторами*, *красители* различных классов и *неорганические пигменты*. В некоторые пластмассы вводятся *стабилизаторы* - химические соединения, способствующие длительному сохранению свойств пластмасс и повышению стойкости пластмасс к воздействию теплоты, света, кислорода воздуха.

По способности к формованию полимерные материалы подразделяются на *термопластичные (термопласты)* и *термореактивные (реактопласты)*. При формовании изделий из термопластов химический состав полимеров не изменяется, а в реактопластах происходит изменение их структуры и состава.

При литьевом прессовании материал в пресс-форме в отдельной камере сначала разогревается, а затем через литниковые каналы выдавливается в оформительную камеру. Прямое прессование применяется для относительно несложных деталей, литьевое - для небольших деталей сложной конфигурации с повышенной точностью размеров. Литье под давлением реактопластов проводится на литьевых машинах различных типов.

Природные смолы. К числу природных смол, имеющих значение в электроизоляционной технике, относятся шеллак, канифоль (гарпиус) и янтарь. Природные смолы представляют собой органические соединения в

основном растительного и биогенного происхождения. При нагревании природные смолы размягчаются и плавятся. В воде природные смолы нерастворимы, а в спирте, эфире, жирных и эфирных маслах и других органических растворителях растворимы.

Шеллак представляет собой продукт жизнедеятельности некоторых насекомых на ветвях тропических деревьев. Он хорошо растворим в спирте, почти нерастворим в бензине и бензоле, плавится при температуре 80 °С, при длительном нагревании переходит в неплавкое и нерастворимое состояние. По диэлектрическим свойствам шеллак относится к слабополярным диэлектрикам. Шеллак применяется в электротехнике главным образом в виде спиртового раствора для изготовления клеящих лаков, для слюдяной изоляции, а также лакировки деталей.

Канифоль-хрупкая смола, получаемая из смолы (живицы) хвойных деревьев. Она растворяется в спирте, бензине, бензоле, нефтяных и растительных маслах и других растворителях, в воде нерастворима. По диэлектрическим свойствам канифоль может быть отнесена к слабополярным диэлектрикам. Она применяется для изготовления лаков и компаундов, используемых в электрической изоляции, добавляется к нефтяному маслу при пропитке бумажной изоляции силовых кабелей, в большом количестве применяется как составная часть многих электроизоляционных смол, в частности феноло-формальдегидных и полиэфирных.

Янтарь - ископаемая смола растений с температурой плавления выше 300 °С; почти не растворяется в растворителях; растворяется после расплавления в скипидаре, сероуглероде, бензине, маслах. Янтарь - слабополярный диэлектрик с высоким значением удельного сопротивления ($\rho_s = 10^{17}$ Ом), которое мало зависит от влажности. Применяется ограниченно из-за дороговизны, главным образом в электроизмерительных приборах, в которых требуется высокое значение сопротивления изоляции.

1.10. Полимеры, получаемые полимеризацией

Линейные неполярные полимеры. К неполярным полимерам с малыми диэлектрическими потерями относятся полиэтилен, полистирол, полиизобутилен, полипропилен, политетрафторэтилен. Эти полимеры имеют наибольшее техническое значение из материалов, получаемых полимеризацией.

Полиэтилен (ПЭ) получают при высоком, среднем и низком давлении полимеризацией этилена в присутствии катализаторов.

Полиэтилен - кристаллизующийся полимер, степень кристалличности которого при комнатной температуре достигает 50...90% в зависимости от способа получения. От других термопластов отличается весьма ценным комплексом свойств. Для полиэтилена характерны высокая прочность, стойкость к действию агрессивных сред и радиации, хорошие диэлектрические свойства, нетоксичность.

Выпускаемый в промышленности полиэтилен в зависимости от способа получения различается по плотности, молекулярной массе и степени кристалличности. Плотность полиэтилена 910...970 кг/м³, температура размягчения 110...130°C.

Наибольшей степенью кристалличности, плотности и температурой размягчения обладает полиэтилен низкого и среднего давления (полиэтилен высокой плотности). Полиэтилен, получаемый при высоком давлении, имеет меньшую плотность. Так как изделия из полиэтилена становятся хрупкими только при температуре 70 °С, то они могут эксплуатироваться в суровых климатических условиях.

Полиэтилены низкого и среднего давления относятся к полимерам с регулярной структурой молекул и называются изотактическими полимерами. С увеличением молекулярной массы и особенно плотности (что характерно для изотактического полиэтилена), возрастает химическая стойкость полимера. Полиэтилен стоек к действию щелочей, растворов солей,

органических кислот (даже к концентрированной соляной и плавиковой кислотам). При температуре выше 80°C ПЭ растворяется во многих растворителях, особенно хорошо в углеводородах и их галогенпроизводных. Для увеличения атмосферостойкости и стойкости к термоокислительным процессам в полиэтилен вводят различные стабилизаторы.

Плотность полиэтилена существенно не влияет на его диэлектрические свойства, но примеси в полиэтилене высокой плотности увеличивают диэлектрические потери. Однако малые диэлектрические потери полиэтилена позволяют использовать электроизоляционные материалы и изделия на его основе в широком диапазоне частот и температур.

В промышленности получают полиэтилен со «сшитой» структурой молекул, когда создаются поперечные химические связи между линейными цепями макромолекул. «Сшитый» полиэтилен можно получить при облучении полиэтилена частицами высоких энергий или при действии специальных перекисных соединений, вызывающих «сшивку» макромолекул при высокой температуре. Такой полимер становится резиноподобным при температуре 110... 115°C и сохраняет прочность при температуре до 200°C.

Полиэтилен применяется как электроизоляционный материал в электротехнике и радиоэлектронике, кабельной промышленности, строительстве, в качестве антикоррозионных покрытий и т.д. Полиэтилен всех марок является физиологически безвредным, поэтому получил широкое применение в производстве товаров народного потребления.

Полистирол $[-\text{H}_2\text{C}-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n$ получают полимеризацией мономерного стирола. Аморфный полистирол получают в виде блоков, эмульсий, суспензий или растворов, а изотактический – при использовании специальных катализаторов. Полистирол - термопластичный материал с высокими диэлектрическими свойствами. Для электротехнических целей в основном применяется блочный полистирол, эмульсионный имеет худшие диэлектрические показатели и используется для изготовления плиточных

пенопластов конструкционного назначения, изотактический из-за трудностей переработки в изделия промышленностью не выпускается.

Полистирол химически стоек, устойчив к воздействию влаги, растворяется в ароматических и хлорированных углеводородах, простых и сложных эфирах. К недостаткам полистирола относятся низкая механическая прочность и невысокая теплостойкость.

Блочный полистирол прозрачен, бесцветен, пропускает 90% видимой части света. Высокий показатель преломления обуславливает применение блочного полистирола для изготовления оптических стекол. Температура стеклования полистирола 80...82°C, а температура эксплуатации изделий из него не должна превышать 60 °C.

Из полистирола получают полистирольную пленку толщиной 10... 100 мкм, называемую *стирофлексом*. Пленка отличается большой прочностью, высокими диэлектрическими показателями и применяется в конденсаторной технике.

Полистирол широко применяется для изготовления деталей электро- и радиоэлектронных приборов, в кабельной промышленности как высокочастотный электроизоляционный материал, а также для изготовления полистирольных лаков.

Полиизобутилен $[-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)_2-]_n$ - высокомолекулярный продукт с линейным строением молекул, получаемый полимеризацией газа изобутилена. При изменении молекулярной массы от 1000 до 400000 можно получать различные виды полиизобутилена - от жидких низкомолекулярных до твердых эластичных, подобных каучуку, высокомолекулярных веществ. Полиизобутилен типичный неполярный диэлектрик с высокими диэлектрическими свойствами. Эластичность этого полимера сохраняется до температуры -78 °C и не зависит от его молекулярной массы. Температура плавления полиизобутилена 80°C. В чистом виде или чаще в композиции с другими полимерами полиизобутилен применяется для изготовления

электрической изоляции высокочастотных кабелей (в композиции с полиэтиленом), уплотнителей, изоляционных заливочных компаундов, клеящих материалов, изоляционных лент. Высокие электрические свойства полиизобутилена и его смесь с полистиролом сохраняется при повышенной влажности. Жидкие полиизобутилены с молекулярной массой от 1500 до 10000 применяются в качестве пропиточных масс в кабельной технике.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) $[-CF_2-CF_2-]_n$ у нас в стране выпускается под названием фторопласт-4 (торговая марка) и получается полимеризацией тетрафторэтилена $F_2C=CF_2$. Степень кристалличности ПТЭФ примерно 90% (при температуре эксплуатации 50...70°C). Кристаллическая структура нарушается при температуре примерно 327°C, после чего полимер переходит в высокоэластическое состояние, сохраняющееся до температуры разложения (примерно 415°C). Рабочая температура измеряется от -269 до 260 °C.

Высокая рабочая температура и химическая стойкость выделяют ПТФЭ из других органических полимеров. ПТФЭ не горит и не растворяется в диапазоне рабочих температур ни в одном растворителе, на него не действуют кислоты, щелочи и другие агрессивные вещества. Превосходя золото и платину по химической стойкости, ПТФЭ не смачивается водой, стоек к воздействию тропического климата и грибковой плесени. Некоторое воздействие на ПТФЭ оказывают лишь расплавленные щелочные металлы и атомарный фтор при повышенных температурах. ПТФЭ имеет исключительно высокие электроизоляционные свойства по сравнению с другими полимерами.

К недостаткам ПТФЭ относятся ползучесть, возникающая под действием небольших механических нагрузок, низкая устойчивость к воздействию электрической короны и радиации.

Обычные для термопластов методы переработки для ПТФЭ непригодны. Изделия из ПТФЭ изготавливаются методом спекания при температуре 260... 380°C предварительно отформованных из ПТФЭ заготовок.

ПТФЭ не склеивается с другими материалами обычными методами, так как имеет плохую адгезию (клеящую способность, прилипание) к другим материалам, поэтому для склеивания его поверхность подвергают специальной обработке (в тлеющем разряде, химическим травлением и др.).

ПТФЭ применяют в радиоэлектронике, электротехнике для изготовления электрической изоляции проводов, кабелей, конденсаторов, трансформаторов, работающих при высоких и низких температурах или в агрессивных средах.

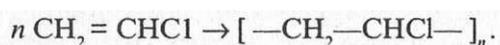
ПТФЭ физиологически безвреден, но при температуре выше 250 °C из него начинается выделение высокотоксичных газообразных продуктов, количество которых резко возрастает при нагревании выше температуры разложения.

При различных ремонтных и других работах с материалами на основе фторопласта не следует забывать, что при высокотемпературной обработке деталей (под влиянием электрической дуги, нагретого жала паяльника) в результате деструкции фторопласта-4 выделяются токсичные газообразные продукты HF, F, которые способны вызвать тяжелые отравления организма человека.

Линейные полярные полимеры. По сравнению с неполярными полимерами материалы этой группы обладают большими значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon = (3...6)$ и повышенными диэлектрическими потерями $[\text{tg } \delta = (1...6) \cdot 10^{-2}$ на частоте 1 МГц]. Такие свойства обуславливаются асимметричностью строения элементарных звеньев макромолекул, благодаря чему в этих материалах возникает дипольно-релаксационная поляризация. Удельное поверхностное сопротивление этих материалов сильно зависит от влажности окружающей среды. К числу этих

полимеров относятся поливинилхлорид, полиэтилентерефталат, фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен), полиамидные смолы. Для электротехнических целей эти полимеры применяются в основном как изоляционные и конструкционные материалы в диапазоне низких частот.

Поливинилхлорид (ПВХ) представляет собой полимер, получаемый полимеризацией хлористого винила с образованием высокомолекулярного соединения по следующей схеме:



Молекула хлористого винила асимметрична и поэтому обладает резко выраженными полярными свойствами. ПВХ благодаря высокому содержанию хлора не воспламеняется и не горит. Разложение ПВХ начинается при температуре 170°C. ПВХ нерастворим в воде, спирте, бензине и многих других растворителях. При нагревании он растворяется в хлорированных углеводородах, ацетон, обладает высокой стойкостью к действию сильных и слабых кислот и щелочей, смазочных масел.

ПВХ хорошо совмещается с пластификаторами, которые улучшают его эластичность, но несколько ухудшают диэлектрические свойства. В электротехнике жесткий материал, называемый *винипластом*, находит ограниченное применение. Для электрической изоляции, в частности для кабельной изоляции, применяется пластифицированный ПВХ, называемый *пластикатом*.

Обычно применяют такие пластификаторы, как дибутилфталат и трикрезилфосфат. Введение пластификатора не только улучшает эластичность ПВХ, но и повышает его морозостойкость. Введением специальных пластификаторов можно получить пластикаты, которые можно использовать при температуре -60°C, однако следует учитывать, что при введении большого их количества резко возрастают потери проводимости.

Материалы на основе ПВХ имеют высокую влагостойкость, что обеспечивает широкое их применение для изоляции защитных оболочек

кабельных изделий, изоляции проводов, а также в виде трубок, лент, листов в электрических машинах и аппаратах, работающих на промышленных частотах. ПВХ применяют также в качестве материала, гасящего электрическую дугу в отключающей аппаратуре.

Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3) $[-\text{CF}_2-\text{CFCl}-]_n$ получают полимеризацией трифторхлорэтилена. Фторопласт-3 или модифицированный фторопласт-3М - кристаллический полимер с температурой плавления кристаллической фазы примерно 215°C.

При температуре выше 260 °С как и фторопласт-4, этот полимер имеет высокую химическую устойчивость, но в отличие от него может перерабатываться в различные электротехнические изделия методом прессования при температуре 220...250°C. По своим электроизоляционным свойствам фторопласт-3 занимает промежуточное положение между поливинилхлоридом и фторопластом-4. Фторопласт-3 применяют для изоляции проводов и кабелей, для изготовления различных деталей радио- и электротехнической промышленности, производства пленок, в производстве конденсаторов и фольгированных диэлектриков.

В промышленности выпускается большое число сополимеров рассмотренных полимеров, т.е. таких соединений, которые получаются из нескольких мономеров и поэтому содержат в цепи неодинаковые элементарные звенья. Соплимеры могут быть получены с нужным комплексом свойств.

1.11. Полимеры, получаемые поликонденсацией

Термореактивные пластмассы можно классифицировать по типу связующего и виду товарной продукции. По типу связующего вещества пластмассы подразделяются на феноло-формальдегидные (фенопласты), эпоксидные, полиэфирные, кремнийорганические, полиимидные; по типу

товарной продукции, поступающей на переработку - на пресспорошки, гранулированные пластмассы, волокниты, компаунды, премиксы, препреги.

Премиксы представляют собой тестообразную массу, полученную в результате смешения рубленого стекловолокна с пастой и содержащую ненасыщенную полиэфирную смолу, инициатор полимеризации, минеральный наполнитель и другие добавки.

Препреги - это листовые материалы, полученные пропиткой термореактивным связующим веществом волокнистых наполнителей, используемых для изготовления изделий из стеклопластиков различными методами.

Феноло-формальдегидные полимеры (смолы). Это продукты поликонденсации фенолов с формальдегидом. В зависимости от условий проведения поликонденсации можно получить термопластичные смолы называемые новолачными, или термореактивные, называемые резольными. Термореактивные смолы называют так же *бакелитом*.

Новолачные смолы получают при избытке фенола (обычно 7:6) в присутствии кислоты, а резольные - при избытке формальдегида (6:7) в щелочной среде. Новолачные смолы сохраняют плавкость и растворимость в этиловом спирте и других растворителях при нагревании. Их можно перевести в резолы действием формальдегида или уротропина (гексаметилентетраамина). Непосредственно после получения бакелит находится в стадии *A* (резол), в которой он сохраняет плавкость и растворимость в спирте. При нагревании бакелита в стадии *A* до температуры 110... 140°C он проходит через промежуточную стадию *B* (резитол), когда смола растворяется лишь частично, и переходит в неплавкую и нерастворимую стадию *C* (резит).

Новолачные смолы применяются для производства лаков и пресспорошков для изготовления электрической изоляции, причем процесс

перехода линейного полимера в пространственный осуществляется в прессах при изготовлении изделий после смешения смолы с уротропином.

Резит (бакелит в стадии С) отличается высокой механической прочностью и сравнительно хорошими электроизоляционными характеристиками. Полярность новолачных смол и бакелита в стадии С связана с наличием в их молекулах гидроксильных групп ОН. Разложение резитов, сопровождаемое обугливанием, происходит при температуре выше 300 °С.

При замене фенола анилином или крезолом получают анилино- и крезоло-формальдегидные смолы. Электрические свойства и водостойкость резитов этих смол лучше, чем у полученных на основе фенола и формальдегида. Все смолы резольного типа широко применяются при изготовлении слоистых пластиков (гетинакса и текстолита).

Феноло-формальдегидные смолы находят широкое применение в качестве связующего в производстве композиционных материалов, называемых фенопластами.

Полиэфирные смолы получают при поликонденсации многоосновных кислот с многоатомными спиртами. Для электроизоляционных целей используют преимущественно этиленгликоль и глицерин. Линейные полиэфиры терефталевой кислоты являются термопластичными полимерами и применяются в виде пленок и волокон, а термореактивные полиэфиры используются в качестве основы лаков.

Термореактивные полиэфиры на основе фталевой кислоты называют *глифталевыми* смолами. Они находят применение после модификации жирными кислотами. Электроизоляционные лаки на основе модифицированных глифталевых смол применяются для пропитки обмоток электрических машин, трансформаторов и других аппаратов, работающих погруженными в минеральное масло.

Глифталевые лаки применяют в кабельной промышленности в качестве связующего вещества стекловолоконистой изоляции обмоточных проводов.

Таблетированные и гранулированные полиэфирные пластмассы приобрели промышленное значение для изготовления электротехнических деталей.

Термопластичный полимер, получаемый из этиленгликоля и терефталевой кислоты, называется *полиэтилентерефталатом*. В нашей стране этот полимер называется *лавсаном*, в США - *дакроном* или *майларом*, в Великобритании - *териленом*.

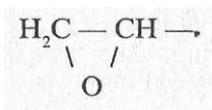
Пленки и нити лавсана применяют при производстве конденсаторов и в качестве пазовой изоляции электрических машин, а также для производства синтетической бумаги. Прочность пленок из лавсана в 10 раз выше, чем пленок из полиэтилена (до 290 МПа). Они имеют высокую электрическую прочность (до 180 МВ/м) и повышенную нагревостойкость (длительная рабочая температура 120... 130°C). Лавсан отличается стойкостью к подавляющему большинству органических растворителей. По диэлектрическим показателям лавсан относится к слабополярным диэлектрикам и отличается высокими диэлектрическими свойствами.

Пленка полиэтилентерефталатная, приготовленная поливом расплава с последующей ориентацией, применяется в качестве основы рентгено-, кино- и фотопленок. Для изготовления гибких печатных плат, кабелей и шлейфов применяется композиционный материал на основе лавсановой пленки и эпоксидно-каучукового покрытия, облицованный электролитической фольгой, толщиной 35 или 50 мкм (лавсан фольгирующий ЛФ-1).

Пленка лавсановая черная ПЭТФ4-ВТ, получаемая методом экструзии из расплава, применяется для вычислительной техники в качестве носителя информации, средств связи и автоматики.

Эпоксидные полимеры широко применяются в различных областях техники, что связано с рядом их ценных свойств, среди которых важное значение имеет способность отвердевать без давления при действии теплоты

и отвердителей в толстых слоях с малыми усадками. Эпоксидные смолы характеризуются наличием в их молекулах эпоксидных групп (колец)



В исходном состоянии эпоксидные смолы представляют собой вязкие жидкости, которые под действием особых веществ - отвердителей - переходят в твердое состояние, становясь термореактивными материалами. В процессе отвердевания, который протекает равномерно, эпоксидные смолы приобретают пространственное строение. Процесс отвердевания является полимеризацией, т.е. протекает без выделения побочных продуктов.

Эпоксидные смолы могут отвердевать при комнатной температуре (холодное отверждение) или при нагревании до температуры 80... 150°C. В последнем случае получается более высокая электрическая прочность. Выбор отвердителя оказывает большое влияние на различные свойства отвердевших эпоксидных смол, такие, как эластичность, нагревостойкость и др. Для холодного отвердевания эпоксидных смол часто применяют азотсодержащие вещества (амины), для отвердевания при нагревании - ангидриды органических кислот. Применению в электротехнике эпоксидных смол способствует их малая усадка при отвердевании, которая не превышает 0,5...2%.

В качестве электроизоляционных и герметизирующих материалов эпоксидные полимеры широко применяются в радиоэлектронике, приборостроении, электротехнике. Как высокопрочные конструкционные материалы они находят применение в ракетной и космической технике, авиации, судостроении, машиностроении, благодаря хорошей адгезии к стеклу, керамике, дереву, пластмассам, металлам эпоксидные полимеры применяются для изготовления высокопрочных клеев. Клеевые швы устойчивы к действию воды, неполярных растворителей, кислот, щелочей и характеризуются высокой механической прочностью. Эпоксидные

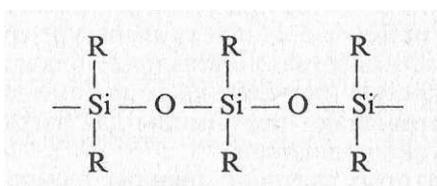
полимеры применяются также для изготовления лакокрасочных покрытий. на основе эпоксидных полимеров изготавливают компаунды горячего и холодного отвердевания.

В качестве наполнителей широко применяют минеральные и органические вещества.

Многие эпоксидные смолы и их отвердители оказывают на организм человека токсическое действие, поэтому работа с ними требует соблюдения необходимых правил предосторожности. Отвердевшие эпоксидные смолы не токсичны.

Кремнийорганические смолы (полиорганосилоксаны, силиконы) были впервые синтезированы в Советском Союзе в 1937 г. благодаря работам К. А. Андрианова. В настоящее время в промышленности выпускается значительное количество кремнийорганических высокомолекулярных соединений, которые находят широкое применение благодаря ряду ценных свойств, прежде всего высокой термо-, тепло-, водо-, атмосферостойкости и хорошим диэлектрическим свойствам.

Кремнийорганические полимеры представляют собой неорганические цепи, состоящие из атомов кремния и кислорода, обрамленных органическими радикалами. Основу строения молекул составляет «силоксанная» цепочка из чередующихся атомов кремния и кислорода:



Полиорганосилоксаны могут быть термопластичными, (иметь линейную структуру молекул) и термоактивными с пространственной структурой. Под *R* подразумеваются органические радикалы, такие, как этил C_2H_5 , метил CH_3 , фенил C_6H_5 .

Свойства полиорганосилоксанов зависят от характера силокса-новой связи и наличия органических радикалов у атомов кремния.

Связь «кремний - кислород» термически более устойчива, чем связь «углерод - углеродная связь». Органические радикалы у атомов кремния снижают термическую стойкость полиорганосилоксанов, но придают им водостойкость и эластичность, характерные для органических материалов.

Кремнийорганические полимеры могут быть получены в виде эластичных смол, твердых тел и жидких диэлектриков. Благодаря тому, что кремнийорганические соединения не смачиваются водой, их используют для придания водоотталкивающих свойств пластическим массам, керамике и другим материалам.

К недостаткам этих смол относятся их сравнительная дороговизна, низкая механическая прочность, плохая адгезия к большинству других материалов и низкая маслостойкость.

Полиорганосилоксановые лаки находят применение в качестве связующих веществ для различных композиционных электроизоляционных материалов, например слюдяных материалов, пластмасс, слоистых пластиков, стеклотканей, пропиточных составов для изоляции электрических машин класса нагревостойкости влагостойкого исполнения, а также для работы в условиях тропиков, для заливки и компаундирования узлов и деталей электронного оборудования.

Полиимиды (ПИ) - полимеры, содержащие имидную группировку атомов. Они относятся к числу наиболее нагревостойких органических полимеров. При температуре 500 °С пленка из полиимидов вдвое прочнее, чем пленка из полиэтилена при температуре 20 °С. Разложение полимера начинается при температуре выше 400 °С, пленка не плавится и не размягчается при температуре до 800 °С. Наряду с высокой нагревостойкостью полиимиды обладают исключительной холодостойкостью (до -269 °С), хорошими

диэлектрическими показателями. Применяют полиимиды для изготовления пленок, лаков, нагревостойких волокон.

Свойства некоторых распространенных термореактивных электроизоляционных полимеров без наполнителей приведены в табл. 4.6.

Композиционные материалы (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит).
Гетинакс получается в процессе горячего прессования бумаги, пропитанной термореактивной смолой. Для ряда марок гетинакса применяется сульфатно-целлюлозная бумага. Гетинакс марки Х, который имеет повышенную штампуемость, и марки ЛГ изготавливаются на основе лавсановой бумаги и эпоксидной смолы.

Основные особенности лавсанового гетинакса - повышенная способность к штампованию, высокие влагостойкость, механические и электрические свойства. Благодаря высокому уровню электрических свойств в условиях повышенной влажности детали из него не требуют лакировки.

Так как гетинакс - слоистый материал, то его электрические свойства вдоль и поперек слоев не одинаковы. Удельное объемное сопротивление вдоль слоев в 50... 100 раз, а электрическая прочность в 5...8 раз ниже, чем поперек слоев. Гетинакс обрабатывается режущим инструментом, изготовленным из твердых сплавов. Поверхностный слой материала при обработке не снимается, так как это ухудшает влагостойкость.

Для изготовления печатных схем радиоэлектронной аппаратуры выпускается примерно 10 различных марок фольгированного с одной и с двух сторон гетинакса. Для изготовления такого гетинакса используется электролитическая медная фольга толщиной 0,035...0,01 мм.

Кроме листовых слоистых пластиков находят применение и намотанные изделия, которые известны под названием гетинаксовых (бакелитовых) трубок и цилиндров различной длины и диаметри. Свойства намотанных изделий уступают свойствам листовых слоистых пластиков.

Текстолит аналогичен гетинаксу, но изготавливается из пропитанной ткани. Текстолит, изготовленный на основе хлопчатобумажной ткани, пропитанной фенолоформальдегидной смолой, можно использовать при температурах от -60 до +105°С. Отличительной особенностью текстолита является повышенное сопротивление раскалыванию и истиранию. Текстолит в 5...6 раз дороже гетинакса.

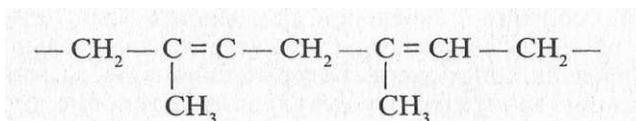
Промышленностью освоен и серийно выпускается ряд марок листовых электротехнических стеклотекстолитов, например стеклотекстолит марки СТЭФ, обладающий высокой механической прочностью при повышенных температурах, огнестойкие стекло- текстолита СТЭБ и СТЭБ-Н, стеклотекстолит СТЭД с повышенными диэлектрическими характеристиками в условиях повышенной относительной влажности. Применение стеклопластиков в качестве электроизоляционного и конструкционного материала и электромашиностроении позволяет создавать электрические машины разных классов нагревостойкости, повышать их надежность и эксплуатации и решать ряд новых технических задач.

Высокие температуры эксплуатации электротехнического оборудования обуславливают преимущественное применение терморезистивных связующих для изготовления деталей из стеклопластиков. Наиболее широкое применение для стеклопластиков электротехнического назначения нашли связующие вещества на основе фенолоформальдегидных, полиэфирных, эпоксидных и кремнийорганических полимеров.

1.12. Резины

Широкое применение в электропромышленности, особенно при производстве кабельных изделий, получила резина. Резина состоит из многокомпонентной смеси на основе каучуков и близких к ним по свойствам веществ, называемых эластомерами. Для получения необходимых свойств резины подвергают процессу так называемой *вулканизации*.

Натуральный каучук (НК) получают из млечного сока (латекса) растений - каучуконосов. Он представляет собой полимерный углеводород состава $(C_5H_8)_n$, в отдельных звеньях молекулы которого имеются двойные связи:



Высокая эластичность каучука обусловлена тем, что его молекулы имеют зигзагообразную, «шарнирную» форму. Под действием растягивающих усилий форма цепочки каучука приближается к прямолинейной, при этом получают рентгенограммы, характерные для кристаллических тел, имеющих упорядоченное расположение молекул в пространстве. В нерастянутом состоянии каучук имеет свойства аморфных тел. Чистый натуральный каучук для изготовления электрической изоляции не применяется, так как он и его растворители имеют малую стойкость к действию повышенных и пониженных температур. Эти недостатки устраняются после проведения процесса вулканизации, т.е. нагревания после введения в каучук серы. При вулканизации двойные связи некоторых цепочечных молекул разрываются и «сшиваются» цепочки молекул через атомы серы с образованием пространственной структуры.

По своим диэлектрическим характеристикам натуральный каучук близок к неполярным диэлектрикам ($\rho \approx 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon_r = 2,4$; $\text{tg } \delta = 0,002$). При увеличении в составе резины серы после вулканизации каучука наблюдается увеличение ϵ_r и $\text{tg } \delta$, связанное с усилением полярных свойств материала из-за влияния атомов серы.

При высокой степени вулканизации в структуре молекулы каучука почти полностью исчезают двойные связи и получается твердый электроизоляционный материал, называемый *эбонитом*. Эбонит содержит от 30 до 35% серы, отличается высокой твердостью, не эластичен, имеет малую холодостойкость. Относительное удлинение перед разрывом для

технических резин составляет 150...500%, а для эбонита - 2...6%. Выпускают эбонит в виде прутков и трубок, которые хорошо поддаются механической обработке. В электротехнической промышленности эбонит применяется как материал, имеющий конструкционное и электроизоляционное значение.

Синтетический каучук (СК) широко применяют наряду с натуральным, особенно в кабельной промышленности. Резины для защитных оболочек кабелей изготавливаются исключительно на основе СК, а в изоляционных смесях более половины НК заменяют на СК.

Бутиловый каучук (бутилкаучук) получают совместной полимеризацией изобутилена с небольшим количеством изопрена или бутадиена. Бутилкаучук отличается более высокой стойкостью к тепловому старению, чем натуральный. Резины на основе бутилкаучука отличаются влагостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами, имеют более высокую озоностойкость, чем резины на основе НК, что определяет их применение для изготовления резиновой изоляции, работающей при относительно высоких температурах и высоких напряжениях. К недостаткам бутилкаучука относятся значительные остаточные деформации при растяжении и сжатии.

Хлоропреновый каучук получают полимеризацией хлоропрена. В нашей стране этот каучук выпускался под названием *ширит*, за рубежом - *неопрен*. Химическое строение хлоропренового каучука обуславливает его весьма ценные специфические свойства из-за присутствия атомов хлора в молекуле хлоропрена, который, является полярным диэлектриком и обладает невысокими электроизоляционными свойствами, но имеет высокую стойкость к действию масла, керосина, бензина. Резины на основе этого каучука имеют значительно более высокую стойкость к действию озона и большую устойчивость к старению, чем резины на основе НК. С наличием хлора связано и другое свойство хлоропренового каучука - негорючесть.

Стойкость наиритовых резин к нефтепродуктам выгодно используется в кабелях, эксплуатируемых при буровых и разведочных работах. Негорючие резины используются в кабелях, предназначенных для работы в шахтах и пожароопасных помещениях.

Недостаток хлоропренового каучука и резин на его основе - низкие электроизоляционные характеристики, повышенная влагопроницаемость, низкая холодоустойчивость, резкое снижение прочности и относительного удлинения при повышении температуры.

Кремнийорганические каучуки в основе каркаса молекулы имеют полисилоксановую цепочку. Для получения резиновых смесей на основе кремнийорганического каучука к нему добавляют наполнители - кремнекислоту (белая сажа), диоксид титана и вулканизирующий агент - пероксид бензоила. Резины на основе кремнийорганических каучуков обладают высокой нагревостойкостью. Длительная рабочая температура 250 °С, разложение полимера наступает при температуре 400°С. К числу преимуществ кремнийорганических резин относится их высокая холодоустойчивость: они сохраняют гибкость при температуре от -70 до 100°С и имеют высокие электроизоляционные свойства.

Недостатками кремнийорганических каучуков и резин на их основе являются невысокие механические свойства, малая стойкость к растворителям и дороговизна.

В кабельных изделиях находят применение кремнийорганические резины марок К-69, К-1520, К-673, К-69Т.

1.13. Лаки, эмали, компаунды, клеи

Электроизоляционные лаки представляют собой коллоидные растворы на лаковой основе, образующие после удаления растворителя пленку, которая обладает электроизоляционными свойствами.

Лаковая основа представляет собой ту часть лака, которая образует пленку и состоит из битумов, высыхающих растительных масел, природных или синтетических смол, а также из их композиций.

Рассмотрим применяемые для лаковой основы растительные масла и битумы.

Растительные масла, получаемые из семян различных растений, способны при нагревании, освещении, соприкосновении с кислородом воздуха и под воздействием других факторов переходить в твердое состояние. Высыхание масел является сложным химическим процессом, связанным с полимеризационными процессами и поглощением маслом некоторого количества кислорода из воздуха, поэтому масса льняного и подобного масел при сушке может несколько увеличиваться.

Наиболее широко применяются льняное и тунговое масла. Если их нанести на поверхность, то они быстро высыхают с образованием твердой неплавкой пленки. Пленки из тунгового масла не растворяются в органических растворителях, стойки к действию воды, а пленки льняного масла почти не растворяются в растворителях.

Наиболее высокими электроизоляционными свойствами обладает тунговое масло, которое является токсичным продуктом. Катализаторами реакций высыхания масел являются соединения свинца, кобальта, кальция, вводимые в масла в виде солей, различных кислот. Такие вещества называются *сиккативами*.

Битумы - черные, твердые или пластичные вещества с аморфной структурой, состоящие в основном из сложной смеси углеводородов и продуктов их дальнейшей полимеризации и окисления. Природные битумы, называемые также *асфальтами*, содержат различные минеральные примеси. Битумы при нагревании переходят в жидкое состояние, при охлаждении затвердевают. При низких температурах они хрупки и дают характерный излом в виде раковины. Лучшие электроизоляционные свойства, как

правило, имеют более тугоплавкие битумы, они труднее растворяются и более хрупки. Температура размягчения битумов может быть повышена пропусканием воздуха через расплавленный битум. По своим диэлектрическим характеристикам битумы могут быть отнесены к слабополярным соединениям. Для электроизоляционной техники наиболее широко применяют нефтяные битумы марок БН-Ш, БН-IV, БН-V и более тугоплавкие спецбитумы марок В и Г.

Растворители - летучие жидкости, применяемые для растворения лаковых основ и улетучивающиеся в процессе образования пленки. Растворителями могут служить ароматические углеводороды, спирты, сложные и простые эфиры, скипидар и др. В состав лака, кроме того, могут входить следующие дополнительные вещества.

Сиккативы вещества, ускоряющие процесс высыхания растительных масел и лаков. *Пластификаторы* - вещества, придающие эластичность и ударную прочность лаковой пленке. *Отвердители* - соединения, способствующие отвердеванию пленки лака. *Инициаторы* и *ускорители* - вещества, ускоряющие процесс образования полимеров. *Ингибиторы* - соединения, препятствующие преждевременному загустеванию.

Электроизоляционные эмали представляют собой лаки, в состав которых входят пигменты - высокодисперсные неорганические вещества, повышающие твердость и механическую прочность лаковой пленки, теплопроводность, дугостойкость. В качестве пигментов часто применяют диоксид титана, железный сурик и др.

Электроизоляционные компаунды в основном состоят из веществ, которые входят в состав лаковой основы электроизоляционных лаков, но в отличие от лаков не содержат растворителей. В момент применения при нормальной и повышенной температуре компаунды находятся в жидком состоянии и твердеют после охлаждения или в результате происходящих в них химических процессов.

В состав компаундов могут входить активные разбавители, понижающие вязкость компаунда, пластификаторы, отвердители, инициаторы и ингибиторы, назначения которых те же, что и в лаках. В состав компаунда могут также входить наполнители - неорганические и органические порошкообразные или волокнистые материалы, применяемые для уменьшения усадки, улучшения теплопроводности, уменьшения температурного коэффициента расширения и снижения стоимости. В качестве наполнителей применяют пылевидный кварц, тальк, слюдяную пыль, асбестовое и стеклянное волокно и ряд других.

Электроизоляционные лаки и компаунды широко применяются в электроизоляционной и кабельной технике, в производстве электрических машин, турбо- и гидрогенераторов, аппаратов, трансформаторов, распределительных устройств, в высокочастотной технике.

Выбор электроизоляционных лаков или компаундов для той или иной конструкции основывается на знании технических требований для данной конструкции и условий ее работы, на физических и электрических характеристиках лаков и компаундов, определяемых соответствующими государственными стандартами и техническими условиями (ТУ).

По назначению и выполняемым функциям электроизоляционные лаки принято подразделять на пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки предназначены для пропитки изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, а также для пропитки различных электроизоляционных материалов волокнистого строения - бумаги, ткани, стеклоткани, электрокартона и др.

Покровные лаки используют для создания внешней защитной отделки различных электроизоляционных деталей, металлических узлов и деталей, покрытия предварительно пропитанных обмоток электрических машин и аппаратов. К этой группе относятся также эмаль лаки, применяемые в

кабельной промышленности, и полупроводящие лаки, обладающие повышенной удельной проводимостью.

Клеящие лаки предназначены для склеивания различных электроизоляционных материалов и деталей, слюды, бумаги, картона и т.п.

Приведенная классификация лаков в значительной мере условна, так как один и тот же лак иногда может служить и пропиточным и клеящим, например бакелитовый лак при производстве слоистых пластиков.

По способу сушки электроизоляционные лаки делятся на лаки воздушной или холодной сушки и печной или горячей.

Лаки воздушной сушки высыхают и образуют пленки требуемого качества при комнатной температуре. Образование пленки лака воздушной сушки может происходить в результате удаления летучих растворителей, окислительных или полимеризационных процессов (в масляных или битумных лаках), а также при введении соответствующих отвердителей холодного отвердевания в лаках на основе некоторых синтетических смол.

Лаки печной или горячей сушки содержат в своей основе высококипящие растворители, медленно улетающие при нормальной температуре или композиции различных термореактивных синтетических смол, в которых во время сушки при высокой температуре (100 °С и выше) происходят реакции окисления, полимеризации или поликонденсации.

По химическому составу лаковой основы электроизоляционные лаки делятся на масляные, смоляные, эфироцеллюлозные.

Масляные (маслосодержащие) лаки состоят из высыхающих растительных масел и натуральных, синтетических смол или битумов с добавлением сиккативов. Из высыхающих масел наиболее часто применяют льняное, тунговое, и их смеси. Растворителями являются алифатические углеводороды (керосин, уайт-спирит), ароматические (толуол, ксилол) или их смеси, а так же скипидар. К группе масляных лаков относятся масляно-

битумные, масляно-канифольные, масляно-алкидные лаки. В состав масляно-битумных лаков входят растительные масла в композиции с асфальтами и асфальтитами или искусственными нефтяными битумами с добавлением сиккатива. В состав масляно-канифольных лаков входят, кроме высыхающих растительных масел, препараты, содержащие канифоль. Масляно-алкидные лаки представляют собой продукт реакции поликонденсации многоатомных спиртов с многоосновными кислотами.

Смоляные лаки получают на основе синтетических смол. Примером являются фенолоформальдегидные смолы, растворенные в этиловом спирте, водные феноло- или крезолоформальдегидные лаки, не содержащие спирта. К этой же группе относятся лаки на основе полиэфирных, эпоксидных, кремнийорганических смол, лаки на основе натуральных смол или битумов.

Эфиrhoцеллюлозные лаки представляют собой растворы различных эфиров целлюлозы (нитроцеллюлоза, этилцеллюлоза) с добавлением пластификаторов - смеси со сложными эфирами, спиртами, кетонами и ароматическими углеводородами. Они ограниченно применяются в электротехнической промышленности.

Электроизоляционные компаунды по назначению и выполняемым функциям делятся на пропиточные и заливочные. Пропиточные компаунды служат для заполнения пор, капилляров и воздушных включений в электроизоляционных материалах, используемых, главным образом, для обмоток электрических машин, катушек аппаратов, трансформаторов и других электротехнических конструкций. После пропитки повышается электрическая прочность материала и всей конструкции в целом, улучшаются теплопроводность, теплоотдача обмоток, что позволяет увеличить мощность электрических машин и аппаратов при тех же размерах, увеличиваются механическая прочность, влагостойкость, срок службы всей конструкции.

По отношению к нагреванию электроизоляционные компаунды делятся на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные компаунды, твердые при нормальной температуре, при нагревании размягчаются, становятся пластичными и переходят в жидкое состояние, при охлаждении снова затвердевают. Расплавление и отвердевание компаундов этой группы можно проводить многократно. Для изготовления этих компаундов часто применяют нефтяные битумы в сочетании с растительными и минеральными маслами, канифолью и некоторыми термопластичными полимерами.

Термореактивные компаунды в момент их применения находятся в жидком состоянии, а затем затвердевают в результате происходящих в них химических реакций. Отвердевание компаундов этой группы происходит под действием отвердителя или катализатора. После отвердевания компаунд становится твердым, неплавким и не растворимым в обычных растворителях. Как и лаки, эти компаунды делятся на компаунды горячего и холодного отвердевания. Компаунды горячего отвердевания переходят в твердое состояние при специальной термической обработке, а компаунды холодного отвердевания переходят в твердое состояние под действием отвердителей.

По химическому составу электроизоляционные компаунды делятся на компаунды, изготавливаемые на основе нефтяных битумов, растительных или минеральных масел и канифоли, и компаунды на основе синтетических смол. В компаунды, изготавливаемые на основе различных нефтяных битумов, иногда добавляют льняное или минеральное масло и канифоль. Компаунды на основе синтетических смол изготавливают на основе полиэфирных, эпоксидных, эпоксидно-полиэфирных кремнийорганических и прочих смол и их композиций.

Пропиточные и заливочные термопластичные компаунды изготавливают на основе битумов, канифоли и масел. Они используются для заливки

кабельных муфт, различных мест соединений выводных концов обмотки электрических машин с подводными проводами и в других электротехнических конструкциях. Перед применением компаунды разогревают до жидкого состояния и заливают на необходимые узлы и детали. К заливочным электроизоляционным компаундам относятся битумные компаунды МБ-70, МБ-90, маслоканифольный МК-45 и др., которые применяются для заливки соединительных, ответвительных и концевых муфт, заделки силовых и контрольных кабелей. Компаунд МБ-55 применяется для заливки конденсаторных высоковольтных вводов.

Высокие электрические и механические свойства терморезистивных компаундов, которые после отвердевания не размягчаются и не вытекают при нагревании, позволили создать *монолитную* и *литую* изоляцию. Такой тип изоляции дает возможность получения изделий в виде малогабаритных блоков (катушки аппаратов, радиосхемы).

Герметическая или литая изоляция хорошо цементирует витки обмотки, обеспечивая высокие механическую и электрическую прочности, влагостойкость, малые термические коэффициенты расширения и теплопроводности.

Литая изоляция применяется: для измерительных трансформаторов тока при напряжении от 220 В до 35 кВ, измерительных трансформаторов напряжения до 15 кВ, якорей и катушек специальных электрических машин, в радиоблоках, выпрямителях, изоляторах, электронных схемах и т.п.

При работе с эпоксидными компаундами следует помнить, что в неотвердевшем состоянии смолы, а также пары отвердителей, например полиэтиленполиамина, являются токсичными веществами, поэтому необходимо защищать от попадания смолы открытые участки кожи лица и рук, а технологический процесс проводить под вытяжкой. Отвердевшие эпоксидные композиции не токсичны.

Кремнийорганические компаунды получили распространение благодаря их высокой нагревостойкости. Широко применяются кремнийорганические эластичные заливочные компаунды на основе кремнийорганических каучуков. Изоляция, выполненная с применением кремнийорганических материалов надежно работает до температуры 180...200°C, а иногда и выше, обладает высокими электрическими свойствами. Компоненты кремнийорганических каучуков малотоксичны.

1.14. Волокнистые материалы

Волокнистые материалы состоят преимущественно из частиц удлиненной формы - волокон, промежутки между которыми заполнены воздухом у непропитанных материалов и природными или синтетическими смолами у пропитанных. Преимуществами многих волокнистых материалов являются невысокая стоимость, довольно большая механическая прочность, гибкость и удобство обработки. Недостатки - невысокие электрическая прочность и теплопроводность, более высокая, чем у массивных материалов того же состава, гигроскопичность. Пропитка улучшает свойства волокнистых материалов.

Непропитанные волокнистые материалы по виду исходного сырья можно подразделить на материалы из: растительных волокон; бумаги, картона, хлопчатобумажной пряжи и ткани; животных волокон (натуральный шелк); искусственных и синтетических волокон (ацетатный шелк, капрон и др.); неорганических волокон (стеклянное волокно, асбест).

Дерево является одним из первых электроизоляционных и конструкционных материалов, получивших применение в электротехнике, чему способствовали его дешевизна и легкость механической обработки. Основой дерева, как и всякого растительного волокна, является органическое вещество - целлюлоза, представляющая собой полимерный углеводород $(C_6H_{10}O_5)_n$, молекулы которого имеют вид длинных цепей с числом

звеньев до двух тысяч. В каждом элементарном звене молекулы содержится по три гидроксильных группы ОН, обуславливающих полярность целлюлозы. Эти группы смещаются в электрическом поле по отношению ко всей молекулярной цепи, что создает эффект дипольно-радикальной поляризации. Поэтому целлюлоза имеет относительно большие диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь [$\epsilon_r = (6,5 \dots 7)$; $\text{tg } \delta = (0,005 \dots 0,01)$]

Более тяжелые породы деревьев имеют большую механическую прочность, чем легкие. Прочность поперек волокон у дерева меньше, чем вдоль.

К недостаткам дерева относятся высокая гигроскопичность, нестандартность свойств, низкая нагревостойкость и горючесть. При пропитке дерева льняным маслом или различными смолами свойства улучшаются. Если детали из дерева предназначены для работы в трансформаторном масле, то после сушки они пропитываются тем же маслом.

В электротехнике дерево применяется для изготовления деревянных опор линий электропередачи, крепежных деталей трансформаторов высокого и низкого напряжения, пазовых клиньев электрических машин и т.п.

Бумага и картон - листовые или рулонные материалы коротковолокнистого строения, состоят в основном из целлюлозы. Наиболее тонкий и высококачественный вид электроизоляционной бумаги - конденсаторная бумага, применяемая для изготовления диэлектрика конденсаторов. Конденсаторную бумагу изготавливают из сульфатной древесной целлюлозы. В нашей стране был разработан простой способ производства борированной целлюлозы, обеспечивающий конденсаторной бумаге резко сниженную зависимость $\text{tg } \delta$ от плотности бумаги. По новой технологии выпускается бумага марок: КОН - обычная, СКОН - специальная, улучшенного качества, МКОН - с малыми диэлектрическими

потерями, ЭМКОН - с высокой электрической прочностью и малыми потерями.

При использовании конденсаторной бумаги в качестве диэлектрика обычно используют несколько слоев с применением различных пропиточных масс, которыми могут быть различные неполярные, полярные, жидкие, полужидкие и твердые пропиточные массы. Применение нескольких слоев обеспечивает перекрытие сквозных отверстий и проводящих включений в отдельных листах. Бумага не является высокочастотным диэлектриком. На переменном токе она используется до частоты 10 кГц.

К числу «старейших» материалов, применяемых в качестве электроизоляционных, относится электрокартон. Это связано с его низкой стоимостью и хорошими технологическими свойствами. В сочетании с высокой стабильностью и механической прочностью при пропитке электрокартона трансформаторным маслом можно получить изоляцию с высокими электрическими параметрами.

Для производства электроизоляционных картонов наиболее широко применяют сульфатную целлюлозу, а в некоторые виды картонов добавляют хлопковую целлюлозу высокой степени чистоты. Картон марки АМ, в который добавляется хлопковая целлюлоза, имеет лучшие электрические характеристики, чем картон марки А. Электроизоляционные свойства картона улучшаются при пропитке его жидким диэлектриком, поэтому электроизоляционный картон широко применяется в качестве основного твердого материала в силовых трансформаторах, для которых он выпускается нескольких различных марок.

Из материалов волокнистого строения в электромашино- и аппаратостроении широко применяется листовая и трубчатая фибра, в основном в качестве конструкционного и изоляционного материалов. Так как под действием электрической дуги фибра выделяет большое количество газов, то в электрических аппаратах она используется

также и в качестве дугогасительного элемента, однако использование фибры для этой цели сокращается из-за возможности применения других материалов с более высокими диэлектрическими и механическими характеристиками (органическое стекло, винипласт, фенолоформальдегидные смолы). Изготавливается фибра из тонкой бумаги, пропускаемой через раствор хлористого цинка. После намотки на стальной барабан и получения слоя нужной толщины, в котором отдельные слои бумаги прилипают друг к другу, фибра срезается с барабана, тщательно промывается водой и прессуется. Промывка необходима для удаления следов хлористого цинка, ухудшающего электроизоляционные свойства фибры. Листовую электротехническую фибру изготавливают марки ФЭ толщиной 0,4... 12 мм. В зависимости от использованного красителя фибра может быть красного, коричневого, черного или серого цвета.

Фибра неустойчива к воздействию влаги, поэтому она не применяется для деталей, требующих сохранения точных размеров, так как при поглощении влаги фибра меняет свои размеры. При нагревании до температуры 180 °С фибра медленно обугливается и при температуре примерно 300 °С воспламеняется.

Лакоткани - гибкие электроизоляционные материалы, представляющие собой ткань, пропитанную электроизоляционным лаком. К пропитанным волокнистым материалам относятся также лако - бумаги и электроизоляционные ленты. Основа пропитанных материалов - ткань или бумага - обеспечивает высокую механическую прочность, гибкость и определенную эластичность. Электроизоляционные лаки, заполняя при пропитке поры ткани, образуют на поверхности после высыхания прочную пленку, которая обеспечивает хорошие электрические свойства и стойкость к действию влаги.

Лакоткани изготавливают на основе хлопчатобумажных, шелковых и стеклянных тканей из синтетических волокон. Они находят применение в

электрических машинах, аппаратах, кабельных изделиях в виде различных лент, прокладок, оберток и др.

В зависимости от типа пропитывающего лака лакоткани подразделяются на светлые (желтые), изготавливаемые на масляных лаках, и черные - на масляно-битумных лаках.

Светлые лакоткани имеют высокие электрические характеристики, устойчивы к воздействию нефтяных масел, бензина, воды, но имеют повышенную склонность к тепловому старению, в процессе которого возрастает жесткость при нагревании.

Черные лакоткани обладают более высокими, чем светлые, электрическими характеристиками, влагостойкостью и меньшим тепловым старением, но не стойки к воздействию масел и бензина. Лакоткани, в которых в качестве основы используется капроновая ткань, превосходят по своей эластичности шелковые, но они менее устойчивы к резкому повышению температуры, например при пайке изолированных проводников.

В производстве лакотканей используется также стеклоткань с различными типами пропитывающих составов (масляных, кремнийорганических, фторопластовых), многие марки которых отличаются высокой устойчивостью к воздействию температуры, влажной среды и других факторов.

Основой лакотканей является, как это было отмечено, различного рода ткань, выполненная методами специальной обработки длиноволокнистого сырья, называемого волокном. Для электроизоляционной техники используются различные типы волокон, в том числе асбестовые волокна, получаемые из минерала *асбест* сложного состава.

Асбестовые волокна по сравнению с органическими менее прочны и более жестки, поэтому в ряде случаев к асбестовому волокну добавляют хлопковые синтетические и другие волокна. Асбестовая пряжа применяется для оплетки нагревостойких проводов и кабелей, предназначенных для работы при

температуре 50...450°C. В электропромышленности выпускаются асбестовые электро- и теплоизоляционные ленты, шнуры, картоны, доски.

В электромашино- и электроаппаратостроении и других отраслях народного хозяйства широко используются электроизоляционные гибкие трубки. Наиболее широкое применение получили лакированные трубки и трубки, изготавливаемые на основе каучука, называемые эластомерными.

1.15. Слюда и слюдяные материалы

Слюды представляют собой группу материалов, относящихся к водным алюмосиликатам с ярко выраженной слоистой структурой, которая обуславливает высокую анизотропию свойств, т. е. неодинаковость физико-механических и электрических характеристик и направлений вдоль и поперек слоев. В качестве электрической изоляции в настоящее время применяют два вида минеральных слюд: *мусковит* и *флогопит*.

Кроме природных слюд применяются также и синтетические. Слюда является весьма ценным природным минеральным электроизоляционным материалом. Использование ее в качестве изоляции крупных турбо- и гидрогенераторов, тяговых электродвигателей и в качестве диэлектрика в некоторых конденсаторах связано с ее высокой электрической прочностью, нагревостойкостью, механической прочностью и гибкостью. В природе слюда встречается в виде кристаллов, которые способны легко расщепляться на пластинки в параллельных друг другу плоскостях (*плоскостях спайности*).

Слюда - достаточно широко распространенный минерал и составляет 3,8% массы земной коры, однако промышленные месторождения мусковита и флогопита, содержащие кристаллы достаточно крупных размеров, немногочисленны. В нашей стране крупноразмерный мусковит добывается в Карелии, Иркутской и Мурманской областях, а флогопит - в Мурманской

области и Якутии. За рубежом крупными слюдяными месторождениями располагает Индия.

Химический состав природной слюды может быть приближенно выражен следующими формулами: $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ мусковит; $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ - флогопит. В состав слюды могут входить другие химические элементы, оказывающие влияние на ее свойства.

По электрическим свойствам мусковит является одним из лучших электроизоляционных материалов и превосходит в этом отношении флогопит. Мусковит более механически прочен, более тверд, гибок и упруг, чем флогопит.

При нагревании слюды до некоторой температуры из нее начинает выделяться входящая в ее состав вода. При этом в результате вспучивания слюда теряет прозрачность, толщина ее увеличивается, механические свойства и электрические характеристики ухудшаются. Для различных слюд температура обезвоживания колеблется в широких пределах: у мусковитов она обычно не менее 200 °С, у флогопитов - не менее 800°С. Некоторые разновидности флогопита имеют более низкие температуры обезвоживания (150... 250°С), что связано с повышенным содержанием воды. Такие слюды находят применение только для малоответственных целей.

Температура плавления слюды зависит от химического состава (1145... 1400°С). Расплавленная слюда при застывании не образует кристаллов прежнего состава. Получаемый после остывания расплава стекловидный материал не является слюдой.

Синтетическая слюда получается в процессе расплавления шихты специально подобранного состава в высокотемпературной печи с последующим весьма медленным охлаждением расплава, в результате чего кристаллизуется синтетическая слюда. Синтетическая слюда, называемая *фтор флогопитом*, обладает более высокой химической стойкостью, нагревостойкостью, радиационной стойкостью, чем природный флогопит.

Слюдяные материалы изготовляют на основе так называемой *щепаной* слюды. После очистки слюды от посторонних минералов при ее извлечении из горных пород она носит название *забойного сырца*. Забойный сырец разбирается вручную, раскалывается ножом на пластинки и обрезается. Полученная щепаная слюда применяется для производства миканитов.

Миканиты представляют собой листовые или рулонные материалы, получаемые склеиванием между собой пластинок щепаной (щипанной) слюды. В качестве склеивающих материалов применяются различные, преимущественно синтетические, смолы или лаки. Часто миканитами называют листовые материалы на основе щепаной слюды. Гибкие или рулонные материалы называются микалентой или микафолием.

Разновидностью формовочного миканита является микафолий - один или несколько слоев щепаной слюды, склеенных лаком между собой с бумажной или стекловолокнуистой подложкой, покрывающей слюду с одной стороны. Он применяется для изготовления твердой изоляции стержней якорных обмоток машин высокого напряжения, а изготавливается из флогопита или мусковита с глифталевым, полиэфирным или кремнийорганическим связующим веществом.

Микалента является разновидностью гибкого миканита. Она клеится из щепаной слюды крупных размеров только в один слой и имеет подложки из стеклоткани, стеклосетки или микалентной бумаги с двух сторон. Микалента является основной изоляцией обмоток многих электрических машин высокого напряжения.

Термоупорный (нагревостойкий) миканит не содержит органического связующего вещества. Изготавливается он на основе флогопита, связующим веществом которого служит фосфорнокислый аммоний (аммофос). Такой миканит, применяемый для изготовления изоляции электронагревательных приборов, можно использовать при температуре несколько сотен градусов.

Слюдиниты и *слюдопласты* являются разновидностью слюдяной бумаги, получаемой из слюдяных отходов без предварительной ручной щепки.

Слюдопластовая бумага служит для изготовления слюдопластов (делится по применению на те же группы, что и слюдиниты). Слюдопластовая бумага изготавливается, как и слюдинитовая бумага, на бумагоделательной машине, но без применения связующего вещества. Такая технология возможна благодаря тому, что сразу после расщепления кристаллы (чешуйки) природной слюды способны прочно соединяться благодаря силам межмолекулярного взаимодействия (силы когезии). По сравнению со слюдинитами слюдопласты имеют, как правило, более высокую механическую прочность и более высокую устойчивость к воздействию электрической короны (короностойкость).

1.16. Стекло и керамика

Стеклообразное состояние является основной разновидностью аморфного состояния вещества.

Стеклами называют аморфные тела, получаемые в результате переохлаждения расплава независимо от их химического состава и температурной области затвердевания, приобретающие в результате постепенного увеличения вязкости механические свойства твердых тел, причем процесс перехода из жидкого состояния в твердое является обратимым.

В составы стекол введена большая часть элементов Периодической системы Д.И.Менделеева. По химическому составу имеющие практическое значение стекла делятся на три основных типа: *оксидные* - на основе оксидов (SiO_2 , GeO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , Al_2O_3), *галогенидные* - на основе галогенидов (BeF_2 , фторбериллатные стекла), *халькогенидные* - на основе сульфидов, селенидов и теллуридов.

Наиболее широко применяются оксидные стекла, которые в зависимости от состава делятся на ряд классов и групп:

по виду оксида-стеклообразователя - силикатные, боратные, фосфатные, германатные, алюмосиликатные и т.д;

по содержанию щелочных оксидов - бесщелочные (могут содержать щелочно-земельные оксиды MgO , CaO , BaO), малощелочные, многощелочные.

Стекла получают в результате «варки» исходных компонентов стекла в стекловаренных печах и при быстром охлаждении расплавленного материала. При расплавлении шихты в результате реакции составляющих оксидов и удаления летучих составных частей (H_2O , CO_2 , SO_3) получается однородная стекломасса, из которой вырабатывают стеклянные изделия. Изготовленные стеклянные изделия подвергаются отжигу при достаточно высокой температуре с последующим медленным охлаждением для устранения механических напряжений.

Физико-химические свойства стекла. Наиболее высокие показатели механических свойств имеют кварцевые и бесщелочные стекла, а наиболее низкие - стекла с повышенным содержанием оксидов PbO , Na_2O , K_2O

Плотность стекол обычно $2200 \dots 6500 \text{ кг/м}^3$. Теплопроводность стекла по сравнению с другими телами исключительно низкая (наибольшую теплопроводность имеют кварцевое и боросиликатное стекла). Термическая стойкость стекла прямо пропорциональна его прочности при разрыве и обратно пропорциональна его упругости и коэффициенту линейного расширения. Химическая устойчивость стекла зависит от сопротивляемости его разрушающему воздействию различных реагентов - воды, кислот, щелочей. Для электротехнических стекол химическая устойчивость имеет в ряде случаев существенное значение. Наибольшей стойкостью к воздействию влаги обладает кварцевое стекло. Гидролитическая стойкость стекол сильно уменьшается при введении в состав стекла щелочных оксидов.

Электрические свойства стекла. Эти свойства сильно зависят от состава стекла. Большинство стекол характеризуется ионной проводимостью. Некоторые специальные виды стекол - халькогенидные, ванадиевые (полупроводниковые) - имеют электронную или смешанную проводимость. Наиболее сильно понижают электропроводность стекол SiO_2 и B_2O_3 . Наименьшую электропроводность имеет кварцевое стекло, а наибольшую - высокощелочное. Обычно более химически устойчивые стекла имеют меньшую электропроводность. Электропроводность стекол очень быстро возрастает при увеличении температуры из-за увеличения подвижности ионов. Удельное объемное сопротивление промышленных стекол при невысоких температурах колеблется в пределах $10^8 \dots 10^{15}$ Ом-м. Существенное влияние на электропроводность стекол имеет поверхностная проводимость, сильно зависящая от адсорбированной водяной пленки.

Диэлектрические потери в стеклах складываются из потерь проводимости и потерь релаксационных и структурных; $\text{tg}\delta$ стекол увеличивается с ростом содержания щелочных оксидов при малом содержании оксидов тяжелых металлов. Стекла с большим содержанием оксидов РЬО и ВаО имеют низкий $\text{tg}\delta$

Самую низкую диэлектрическую проницаемость имеет кварцевое стекло [$\epsilon_r = (3,7 \dots 3,8)$] и стеклообразный борный ангидрид [$\epsilon_r = (3,1 \dots 3,2)$], у которых наблюдается преимущественно электронная поляризация. При наличии в составе стекол оксидов металлов свинца и бария, обладающих высокой поляризуемостью, $\text{tg}\delta$ увеличивается примерно до 20.

Пробой стекол вызывается электрическими и тепловыми процессами. При постоянном напряжении электрическая прочность стекла весьма велика и достигает 500 МВ/м, а при увеличении температуры резко снижается. В переменном электрическом поле электрическая прочность стекол 17...80 МВ/м.

Наиболее высокими свойствами обладает кварцевое стекло, выплавляемое из горного хрусталя или чистых кварцевых песков. Кварцевые стекла отличаются высокой оптической прозрачностью, механической прочностью при высоких температурах (свыше 1000°C), инертностью к действию многих химических реагентов, высокими электрическими характеристиками: при нормальной температуре $\text{tg } \delta = 0,0002$; $\epsilon_r = 3,8$; при температуре 200°C $\rho_v = 10^{15}$ Ом · м.

Кварцевое стекло применяется для изготовления различных изделий в электрорадиовакуумной промышленности: трубчатые, опорные и проходные изоляторы для электрических газоочистительных установок, высоковольтные изоляторы для высоковольтных линий, различные детали переменных конденсаторов, катушек самоиндукции, ламп, приборов, аппаратов и пр.

Закаленные изоляторы из обычного щелочного стекла, хотя и уступают по своим свойствам таким же изоляторам из малощелочного стекла, могут эффективно использоваться в качестве подвесных изоляторов. В нашей стране подвесные закаленные стеклянные высоковольтные изоляторы ПС-4-5 установлены на линиях электропередачи напряжением 31, 110 и 220 кВ.

Разнообразие и особенности свойств полупроводниковых стекол открывают широкие возможности для их применения в электронных приборах и устройствах, например в термосопротивлениях, светофильтрах и фотосопротивлениях, сочетающих в себе избирательное поглощение света с повышенной электропроводностью.

Электротехническая керамика. Это материал, получаемый в результате обжига формовочной массы заданного химического состава из минералов и оксидов металлов. При соответствующем выборе состава керамики из нее можно получить материалы, обладающие разнообразными свойствами. В электротехнической и радиоэлектронной промышленности керамическая технология применяется для изготовления диэлектрических,

полупроводниковых, пьезоэлектрических, магнитных, металлокерамических и других изделий. Многие керамические материалы имеют высокую механическую прочность и нагревостойкость, высокие электрические характеристики, отсутствие механических деформаций при длительном приложении нагрузки, большую, чем у органических материалов, устойчивость к электрическому и тепловому старению. Керамику можно подвергать металлизации обычно методом выжигания серебра и осуществлять герметичные спаи с металлом.

Широкое применение в качестве электроизоляционного материала находит электротехнический фарфор, который является основным керамическим материалом, используемым в производстве широкого ассортимента низковольтных и высоковольтных изоляторов и других изоляционных элементов с рабочим напряжением до 1150 кВ переменного и до 1500 кВ постоянного тока. Электротехнический фарфор, как и любая керамика, состоит из кристаллической, аморфной и газовой фаз. Его свойства определяются химическим и фазовым составами, микро- и макроструктурой и технологией изготовления.

Основными компонентами фарфора являются сырьевые материалы минерального происхождения - глинистые вещества (каолин и глина, кварц, полевой шпат, гипс, пегматит).

Изделия из фарфоровой массы получают различными обточкой, прессовкой, отливкой в гипсовые формы, выдавливанием через отверстие нужной конфигурации. После оформления изделия производится сушка полуфабриката для удаления воды, вводимой в массу для придания ей пластичности. Следующая операция - глазурирование фарфоровых изоляторов - выполняется для предохранения от загрязнения и создания поверхности, легко очищаемой в условиях эксплуатации. При обжиге глазурное покрытие плавится и покрывает поверхность изолятора тонким стекловидным слоем. Глазурь увеличивает механическую прочность «заглаживая» трещины и

другие дефекты, уменьшает ток утечки по поверхности изоляторов и повышает их напряжение перекрытия.

Наличие стекловидной фазы определяет довольно высокую механическую прочность фарфора. Фарфор имеет высокий предел прочности на сжатие (400... 700 МПа), значительно меньший предел прочности при растяжении (45...70 МПа) и изгибе (80... 150МПа). Электроизоляционные свойства фарфора при нормальной температуре позволяют использовать его при низких частотах: $\epsilon \approx 6...7$, $\text{tg} \delta \approx 0,02$; $\text{tg} \delta$ электротехнического фарфора, однако быстро растет при увеличении температуры, что затрудняет применение его при высоких температурах и на высоких частотах.

Электротехнический фарфор применяется для изготовления высоковольтных и низковольтных изоляторов различного типа. К числу высоковольтных изоляторов относятся:

стационарные для оборудования распределительных устройств и аппаратуры (опорные, проходные, вводы, маслонаполненные, покрышки разного назначения);

линейные для линий электропередачи (подвесные и штыревые). Для изготовления высокочастотных высоковольтных изоляторов применяют стеатитовую керамику, так как фарфор имеет сильную зависимость электрических характеристик от температуры из-за наличия большого количества полевошпатового стекла с повышенной электропроводностью.

Стеатитовая керамика изготавливается на основе тальковых минералов, основной кристаллической фазой которых является метасиликат магния $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$. Стеатитовые материалы характеризуются высокими значениями ρ , в том числе при высокой температуре, малым $\text{tg} \delta$ за исключением материала, предназначенного для производства крупных высоковольтных изоляторов. Стеатитовая керамика характеризуется высокими механическими свойствами, стабильностью параметров при воздействии различных внешних факторов (влаги, температуры, высокого напряжения и др.).

Благодаря высоким электромеханическим свойствам стеатит применяют для изготовления высокочастотных установочных деталей, высоковольтных и низковольтных конденсаторов, высоковольтных, антенных, внутриламповых, пористых и других изоляторов. Пластичный высокочастотный высоковольтный стеатитовый материал СПК-2 применяется для изготовления крупногабаритных изоляторов, а непластичные СНЦ, СК-1, Б-17, С-55 и С-4 - электроизоляционных деталей и высокочастотных конденсаторов.

Для применения в радиотехнической и электронной промышленности было разработано большое количество новых керамических материалов, обладающих лучшими свойствами по сравнению с фарфором.

Радиофарфор представляет собой фарфор, стекловидная фаза которого облагорожена введением в нее тяжелого оксида ВаО.

Ультрафарфор различных марок характеризуется большим содержанием Al_2O_3 и является усовершенствованным радиофарфором. Ультрафарфор имеет по сравнению с обычным фарфором повышенную механическую прочность и теплопроводность.

Высокоглиноземистая керамика (алюминооксид) в основном состоит из оксида алюминия (глинозема) Al_2O_3 . Этот материал требует весьма высокой температуры обжига (до $1750^\circ C$), затрудняющей его изготовление. Он отличается хорошими характеристиками: нагревостойкостью до температуры $1600^\circ C$, высоким ρ и малым $tg\delta$ при повышенных температурах, чрезвычайно высокой теплопроводностью и механической прочностью.

Поликор, имеющий особо плотную структуру (близкую к теоретической для Al_2O_3), обладает оптической прозрачностью и применяется для изготовления колб некоторых специальных источников тока.

Конденсаторная керамика имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 10 \dots 230$ или $\epsilon_r = 900$. В первом случае керамика относится к

высокочастотным диэлектрикам; $\text{tg } \delta$ на частоте 1 МГц не должен превышать 0,0006. Во втором случае имеет место керамика низкочастотная; на частоте 1000 Гц $\text{tg } \delta = (0,002 \dots 0,025)$. К конденсаторной керамике обычно предъявляется требование возможно меньшего значения температурного коэффициента диэлектрической проницаемости.

Многие из конденсаторных материалов имеют в своем составе диоксид титана - рутил (TiO_2). В принятом обозначении такие составы имеют букву Т (титановая керамика); следующая цифра обычно обозначает номинальную диэлектрическую проницаемость. Эти материалы называют также *тикондами*. Среди них можно выделить керамику на основе титаната кальция и титаната стронция - CaTiO_3 и

SrTiO_3 . При высоких частотах у этих материалов температурная зависимость $\text{tg } \delta$ выражена слабо, однако эти виды материалов характеризуются пониженной электрической прочностью (8... 12 М В/м).

При длительном воздействии постоянного напряжения тикондовая керамика подвергается электрохимическому старению. Из-за высокого отрицательного значения температурного коэффициента ϵ_r , эти материалы применяются для конденсаторов, к которым не предъявляются требования температурной стабильности емкости. Для повышения температурной стабильности в керамику вводят компоненты с положительным значением температурного коэффициента ϵ_r . Такие материалы часто называют термокомпенсированными. К этой группе относятся титано-циркониевая керамика $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$; $\text{CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$; лантановая керамика $\text{LaAlO}_3\text{-CaTiO}_3$, станнатная и другие керамические материалы. Преимуществом беститановой керамики является более высокая устойчивость к воздействию постоянного напряжения.

В ряде случаев для изготовления конденсаторов применяют ультрафарфор, стеатит и другие виды установочной керамики.

Основу низкочастотной керамики составляют титанат бария BaTiO_3 и твердые растворы на его основе. Эти материалы отличаются высокими значениями диэлектрической проницаемости и ее нелинейной зависимостью от напряженности электрического поля.

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Общие сведения и классификация полупроводников

Полупроводники по удельному сопротивлению ($10^{-6} \dots 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при комнатной температуре) занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Полупроводники обладают рядом характерных только для них свойств, резко отличающихся от проводников:

в большом интервале температур их удельное сопротивление уменьшается, т.е. они имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления;

при введении в полупроводник малого количества примесей их удельное сопротивление резко изменяется;

полупроводники чувствительны к различного рода внешним воздействиям - свету, ядерному излучению, электрическому и магнитному полям, давлению и т.д.

Полупроводниковыми свойствами обладает целый ряд материалов - природных и синтетических, органических и неорганических, простых и сложных по химическому составу.

К простым полупроводникам относятся германий, кремний, селен, теллур, бор, углерод, фосфор, сера, сурьма, мышьяк, серое олово, йод.

Полупроводниками являются сложные соединения различных элементов таблицы Д. И. Менделеева, соответствующие общим формулам:

двойные (бинарные) соединения: $A^I B^{VII}$ (CuCl, AgBr и др.); $A^I B^{VI}$ (Cu_2O , CuS и др.); $A^I B^V$ (KSb, K_3Sb и др.); $A^{II} B^{VII}$ ($ZnCl_2$, $CdCl_2$ и др.); $A^{II} B^{VI}$ (ZnO, ZnS, CdS и др.); $A^{II} B^V$ (ZnSb, Mg_3Sb_2 и др.); $A^{II} B^{IV}$ (Mg, Sn, CaSi и др.); $A^{III} B^{VI}$ (GaS, In_2Fe_3 и др.); $A^{III} B^V$ (GaP, GaAs, InSb и др.); $A^{IV} B^{VI}$ (GeO_2 , PbS и др.); $A^{IV} B^{IV}$ (SiC); $A^V B^{VI}$ (Sb_2Te_3 , Bi_2S_3 и др.); $A^{VI} B^{VI}$ (MoO_3 , WO_3); $A^{VII} B^{VI}$ (Fe_2O_3 , NiO);

тройные соединения: $A^I B^{III} B^{VI}_2$ ($CuAlS_2$, $CuInS_2$ и др.); $A^I B^V B^{VI}_2$ ($CuSbS_2$), ($CuAsS_2$ и др.); $A^I B^{VIII} B^{VIII}_2$ ($CuFeS$, и др.); $A^{II} B^I B^V_2$ ($ZnSiAs_2$, $ZnGeAs_2$); $A^{IV} B^V B^{VI}_2$ ($PbSiSe_2$); твердые растворы: GeSi; $GaAs_{1-x}P_x$ и др.

К органическим полупроводникам относятся фталоцианин, актрацин, нафталин, коронсл и др.

Собственные и примесные полупроводники. Как и в металлах, электрический ток в полупроводниках связан с дрейфом носителей заряда. Но если в металлах наличие свободных электронов обусловлено природой металлической связи, то появление носителей заряда в полупроводниках определяется рядом факторов, важнейшими из которых являются чистота материала и температура. В зависимости от степени чистоты полупроводники подразделяют на собственные и примесные.

Полупроводник, в котором в результате разрыва связей образуется равное количество свободных электронов и дырок, называется *собственным* (рис. 2.1, а).

Каждый атом на своей внешней оболочке содержит четыре электрона. Каждый из этих электронов создает пару с электроном соседнего атома, образуя ковалентную связь. Ковалентная связь достаточно прочна, и для того, чтобы освободить электрон, требуется определенная энергия.

С повышением температуры из-за увеличения тепловой энергии некоторые электроны разрывают ковалентную связь и появляются в зоне проводимости (рис. 2.2, а). В кристалле собственного полупроводника каждому электрону в зоне проводимости соответствует одна дырка,

оставленная им в валентной зоне. В этом случае свободный электрон обладает энергией, большей той, которую он имел в связанном состоянии, на значение, не меньшее энергии ширины запрещенной зоны.

Так как при каждом акте возбуждения в собственном полупроводнике одновременно создаются два носителя заряда противоположных знаков, то общее количество носителей заряда в 2 раза больше числа электронов в зоне проводимости, т.е. $n_i = p_i$; $n_i + p_i = 2n_i$. При приложении к кристаллу внешнего электрического поля свободные электроны перемещаются против поля (из-за отрицательного заряда), а дырки - в направлении поля. Но электроны, хотя и движутся в противоположном направлении, создают обычный ток, совпадающий с внешним приложенным полем. Следовательно, электронный и дырочный токи текут в одном и том же направлении и поэтому укладываются.

Для большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники. Полупроводник, имеющий примеси, называется *примесным*, а проводимость, созданная введенной примесью, называется *примесной проводимостью*.

Преобладающее значение $| \sigma |$ проводимости кристалла имеют электроны, и поэтому они называются *основными* носителями заряда, а дырки - *неосновными*. Та кой полупроводник называется электронным, или *n*-типа, а примесь, отдающая электроны, носит название *донорной*.

На энергетической диаграмме наличие примеси в решетке полупроводника характеризуется появлением локального энергетического уровня, лежащего в запрещенной зоне.

Примесь, захватывающая электроны, называется *акцепторной*. Для образования свободной дырки за счет перехода электрона от атома основного вещества к атому примеси требуется значительно меньше энергии, чем для разрыва ковалентных связей кремния. Поэтому количество дырок может быть значительно больше количества свободных электронов и проводимость

кристалла будет дырочной. В таком полупроводнике основными носителями заряда являются дырки, а неосновными - электроны.

Полупроводник с акцепторными примесями называется дырочным полупроводником или *p*-типа.

В полупроводниках могут одновременно содержаться донорная и акцепторная примеси. Такие полупроводники называются *компенсированными*.

2.7. Простые полупроводники

Германий. Германий - один из наиболее тщательно изученных полупроводников, и многие явления, характерные для полупроводников, впервые экспериментально были обнаружены на этом материале.

Существование и основные свойства германия предсказал Д.И.Менделеев в 1870 г., назвав его экасилицием. В 1886 г. немецкий химик К. Винклер обнаружил в минеральном сырье новый элемент, который он назвал германием. Германий оказался эквивалентен экасилицию. Содержание германия в земной коре невелико, но встречается он в естественных условиях во многих частях света. Выделяют германий из германийсодержащей руды чаще всего в результате химической переработки сырья с помощью концентрированной HCl в виде тетрахлорида германия GeCl₄.

Тетрахлорид германия - летучая жидкость, которую подвергают глубокой очистке, используя методы экстракции и ректификации. После очистки GeCl₄ гидролизуют водой, в результате чего получается диоксид германия GeO₂ - порошок белого цвета. После просушки GeO₂ восстанавливается в потоке очищенного водорода при температуре 650 °C до элементарного германия, представляющего собой серый порошок. Восстановленный таким образом германий подвергается травлению в смеси кислот и его сплавляют

в слитки. Слитки используют в качестве исходного материала для получения особо чистого германия методом зонной плавки или же непосредственного получения монокристаллов методом вытягивания из расплава.

Сущность метода зонной плавки заключается в том, что узкая расплавленная зона перемещается вдоль горизонтально расположенного образца, находящегося в графитовой или кварцевой «лодочке». Примеси, имеющиеся в образце, оттесняются к концу слитка. Для высококачественной очистки весь процесс повторяют много раз или используют установки более совершенной конструкции, позволяющие создавать вдоль слитка одновременно четыре или пять расплавленных зон.

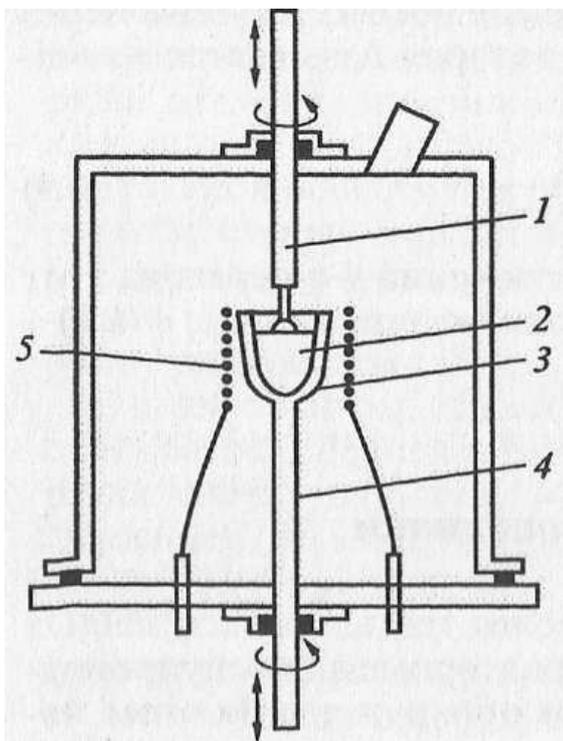


Рис. 5.11. Схема установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского

Для получения монокристалла по методу вытягивания из расплава тщательно очищенный от примесей германий расплавляют в установке (рис. 2.11). Рабочим объемом служит герметическая водоохлаждаемая камера, внутри которой создается вакуум под давлением 10^{-4} Па или защитная газовая

среда (из водорода или аргона высокой чистоты). Материал 2 помещается в тигель 3, насаженный на конец водоохлаждаемого штока 4. Шток 4 при помощи электропривода приводится во вращение с постоянной скоростью. Его можно опускать или поднимать для подбора оптимального положения тигля с расплавом по отношению к нагревательному элементу 5, в качестве которого используют обычно печь сопротивления или источник индукционного высокочастотного нагрева. Через верхний фланец камеры соосно с нижним штоком 4 вводится верхний шток 1, на нижнем конце которого крепится монокристаллическая затравка кристаллизуемого материала.

Затравка вводится в расплав и выдерживается в нем, пока не произойдет оплавление поверхности. После этого затравку, вращая, начинают медленно поднимать. За затравкой тянется жидкий столбик расплава, удерживаемый поверхностным натяжением. Попадая в область низких температур над поверхностью тигля, расплав затвердевает, образуя одно целое с затравкой. Этим способом получают монокристаллы германия диаметром до 100 мм, а иногда и более.

Чистый германий обладает металлическим блеском, характеризуется относительно высокой твердостью и хрупкостью. Он кристаллизуется в структуре алмаза, плавится при температуре 937 °С, плотность при температуре 25 °С равна 5,33 г/см³. В твердом состоянии германий - типичный ковалентный кристалл. Кристаллический германий химически устойчив на воздухе при комнатной температуре. Размельченный в порошок германий при нагревании на воздухе до температуры примерно 700 °С легко образует диоксид германия GeO₂. Германий слабо растворим в воде и нерастворим в соляной и разбавленной серной кислотах. Активными растворителями германия в нормальных условиях является смесь азотной и плавиковой кислот и раствор перекиси водорода. При нагревании германий

интенсивно взаимодействует с галогенами, серой и сернокислыми соединениями.

Германий, применяемый в полупроводниковых приборах, обладает удельным сопротивлением от миллионных долей до значений, близких к удельному сопротивлению собственного германия.

Пример маркировки германия - ГДГ 0,75/0,5, где первая буква обозначает название материала (Г - германий), вторая - тип электропроводности (Э - электронный, Д - дырочный), третья - название легирующей примеси (в данном случае галлия). Числитель дроби указывает значение удельного сопротивления (0,75 Ом-см), знаменатель - диффузионную длину неосновных носителей заряда (0,5 мм).

Германий применяется для изготовления диодов различных типов, транзисторов, датчиков ЭДС Холла, тензодатчиков. Оптические свойства германия позволяют его использовать для изготовления фотодиодов и фототранзисторов, модуляторов света, оптических фильтров, а также счетчиков ядерных частиц. Рабочий диапазон температур германиевых приборов от -60 до +70 °С.

Кремний. В противоположность германию кремний является одним из самых распространенных элементов в земной коре; его содержание в ней примерно 29%. Однако в свободном состоянии в природе он не встречается, а имеется только в соединениях в виде оксида и в солях кремниевых кислот. Чистота природного оксида кремния в виде монокристаллов кварца иногда достигает 99,9%; в ряде месторождений чистота песка достигает 99,8-99,9%.

Технический кремний, получаемый восстановлением природного диоксида SiO_2 (кремнезем) в электрической дуге между графитовыми электродами, широко применяется в черной металлургии как легирующий элемент (например, трансформаторная сталь) и как раскислитель при производстве стали. Технический кремний представляет собой мелкокристаллический спек, содержащий примерно 1% примесей, и как

полупроводник использоваться не может. Он является исходным сырьем для производства кремния полупроводниковой чистоты, содержание примесей в котором должно быть менее $10^{-6}\%$.

Технология получения кремния полупроводниковой чистоты включает в себя следующие операции: превращение технического кремния в легколетучее соединение, которое после очистки может быть легко восстановлено; очистка соединения физическими и химическими методами; восстановление соединения с выделением чистого кремния; конечная очистка кремния методом бестигельной зонной плавки; выращивание монокристаллов.

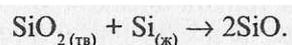
В полупроводниковом производстве наибольшее распространение получил метод водородного восстановления трихлорсилана SiHCl_3 . Его получают обработкой измельченного технического кремния сухим хлористым водородом при температуре 300... 400 °C: $\text{Si} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$.

Трихлорсилан представляет собой жидкость с температурой кипения 32°C. Поэтому он легко очищается методами экстракции, адсорбции и ректификации.

В отличие от германия, основная очистка кремния от примесей осуществляется химическими методами. Кристаллизационные методы имеют цель - превратить поликристаллический кремний, полученный химическим способом, в монокристаллы с определенными электрофизическими свойствами. Объемные кристаллы кремния получают методами выращивания из расплава и бестигельной вертикальной зонной плавки. Первый метод применяется, как правило, для получения крупных монокристаллов с относительно небольшим удельным сопротивлением (менее 2,5 Ом). Второй метод используется для получения высокоомных монокристаллов кремния с малым содержанием остаточных примесей. Следует заметить, что в технологическом отношении кремний более сложный материал, чем германий, так как он имеет высокую температуру

плавления (1412°C) и в расплавленном состоянии химически весьма активен (вступает в реакцию со всеми тигельными материалами).

Метод вытягивания из расплава был ранее описан. Существенным недостатком этого метода при использовании его для выращивания монокристаллов кремния, является загрязнение кристаллов кислородом. Источником кислорода служит кварцевый тигель, который взаимодействует с расплавом в соответствии с реакцией



Растворение кварца в кремнии не только приводит к насыщению кислородом, но при этом вводятся и другие примеси, загрязняющие кремний.

Вертикальная бестигельная зонная плавка обеспечивает очистку кристаллов кремния от примесей и возможность выращивания монокристаллов кремния с малым содержанием кислорода. В этом методе узкая расплавленная зона удерживается между твердыми частями слитка благодаря силам поверхностного натяжения. Расплавление слитков осуществляется с помощью высокочастотного индуктора (рис. 2.13), работающего на частоте 5 МГц. Высокочастотное нагревание позволяет проводить процесс бестигельной зонной плавки в вакууме и в атмосфере защитной среды.

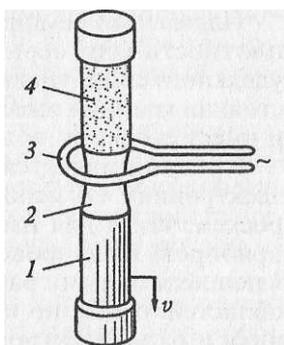


Рис. 5.13. Схема бестигельной зонной плавки:
 1 – монокристалл; 2 – расплавленная зона; 3 – индуктор; 4 – поликристаллический стержень

Методом вертикальной бестигельной зонной плавки получают кристаллы кремния диаметром до 100 мм. Кристаллы кремния *n*- и *p*-типов получают введением при выращивании соответствующих примесей, среди которых наиболее часто используются фосфор и бор. Такие кристаллы электронного и дырочного кремния маркируются соответственно КЭФ и КДБ.

Проводимость кремния, как и германия, очень сильно изменяется из-за присутствия примесей. Благодаря более широкой запрещенной зоне собственное удельное сопротивление кремния на три с лишним порядка превосходит собственное сопротивление германия.

Кристаллический кремний при комнатных температурах обладает невысокой реакционной способностью; он весьма устойчив на воздухе, покрываясь тонкой пленкой диоксида кремния. Кремний нерастворим в воде, не реагирует со многими кислотами. Хорошо растворяется лишь в смеси азотной и плавиковой кислот и в кипящей щелочи.

Плавление кремния сопровождается некоторым увеличением его плотности (примерно на 8%) и скачкообразным уменьшением удельного сопротивления (примерно в 30 раз). В расплавленном состоянии кремний имеет удельное сопротивление примерно 10^{-4} Омм и имеет свойства, подобные жидким металлам.

Кремний является базовым материалом полупроводниковой электроники. Он используется как для создания интегральных микросхем, так и для изготовления дискретных полупроводниковых приборов. Полупроводниковые интегральные микросхемы, отличающиеся малыми размерами и сложной конфигурацией активных областей, особенно широко применяются в вычислительной технике и радиоэлектронике. Из кремния изготавливаются различные типы полупроводниковых диодов: низкочастотные (высокочастотные), маломощные (мощные), полевые транзисторы; стабилитроны; тиристоры. Широкое применение в технике нашли кремниевые фотопреобразовательные приборы: фотодиоды, фототранзисторы, фотоэлементы солнечных батарей. Подобно германию, кремний используется для изготовления датчиков Холла, тензодатчиков, детекторов ядерных излучений. Благодаря тому, что ширина запрещенной зоны кремния больше, чем ширина запрещенной зоны германия, кремниевые приборы могут работать при более высоких температурах, чем германиевые. Верхний температурный предел работы кремниевых приборов достигает 180...200°C.

Селен. Этот элемент VI группы таблицы Менделеева обладает рядом полезных электрических свойств. Он существует в нескольких аллотропных модификациях - стеклообразной, аморфной, моноклинной, гексагональной. Плавится селен при температуре 220°C, хотя температура плавления неопределенна; кипит при температуре 685°C; все модификации селена превращаются в гексагональную кристаллическую при нагревании в интервале температур 180...220°C.

Селен широко распространен в земной коре, но обычно в малых концентрациях. Для получения селена используют отходы производства серной кислоты, накапливающиеся в пыльных камерах, или анодный шлам, получаемый при электролитической очистке меди. Для получения селена шлам нагревают, селен испаряется и адсорбируется в газоуловителе, орошаемом потоком серной кислоты. К раствору добавляют соляную кислоту; при пропускании через раствор диоксида серы селен осаждается.

Осадок отфильтровывают, промывают, плавят и получают слитки селена необходимой формы. Для очистки селена используют методы вакуумной ректификации и очистку с помощью ионнообменных смол. В результате содержание примесей уменьшается до $10^{-4}\%$.

Для изготовления полупроводниковых приборов (выпрямителей переменного тока и фотоэлементов) используется серый кристаллический гексагональный селен. Ширина его запрещенной зоны 1,79 эВ. Такой селен обладает дырочным типом электропроводности. Его удельное сопротивление примерно $10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при комнатной температуре). Снижение удельного сопротивления обычно достигается введением примесей - хлора, брома, йода.

Селен в отличие от других полупроводников обладает аномальной температурной зависимостью концентрации свободных носителей заряда: она уменьшается с ростом температуры, подвижность носителей заряда при этом возрастает. Электрические свойства селена измерялись многими исследователями, однако данные весьма противоречивы.

Кроме использования в электронике селен широко применяется в технологии получения красок, пластмасс, резины, керамики, как легирующая добавка при производстве стали, в электрофотографии.

Теллур. Это элемент VI группы таблицы Менделеева. Он является полупроводником с шириной запрещенной зоны 0,35 эВ, плавится при температуре 451 °С, легко испаряется. Температура кипения теллура при атмосферном давлении 1390°С, очищают его многократной перегонкой.

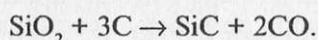
Поликристаллический слиток теллура получают в процессе медленного охлаждения расплавленного в открытом тигле теллура. Затем из слитка вырезают несколько монокристаллов.

Удельное сопротивление чистого теллура при комнатной температуре $29 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Он может быть электронного и дырочного типов проводимости. Техническое применение теллур нашел в виде сплавов с

висмутом, сурьмой и свинцом, которые используют для изготовления термоэлектрических генераторов.

Карбид кремния. Он является единственным бинарным соединением, образованным полупроводниковыми элементами IV группы таблицы Менделеева. Это полупроводниковый материал с большой шириной запрещенной зоны (2,8...3,1 эВ) (в зависимости от модификаций). Карбид кремния применяют для изготовления полупроводниковых приборов, работающих при высоких температурах (до 700 °С).

Технический карбид кремния изготавливают в электрических печах при восстановлении диоксида кремния (кварцевого песка) углеродом:



В печи образуются сросшиеся пакеты кристаллов SiC, называемые *друзами*. Большинство кристаллов в друзах имеет незначительные размеры, однако встречаются кристаллы, имеющие площадь до 1,5...2 см². Из друз в результате дробления получают порошок карбида кремния. Кристаллы карбида кремния полупроводниковой чистоты получают методом возгонки в печах с графитовыми нагревателями и экранами. Процесс кристаллизации проводят в атмосфере аргона при температуре 2400... 2600°С. Получаемые кристаллы обычно имеют пластинчатую форму с размером в поперечнике примерно 1 см. Карбид кремния является одним из наиболее твердых веществ, он устойчив к окислению до температур свыше 1400 °С. При комнатной температуре карбид кремния не взаимодействует с кислотами. При нагревании он растворяется в расплавах щелочей, а также взаимодействует с ортофосфорной кислотой и смесью ($\text{HNO}_3 + \text{HF}$).

Электропроводность кристаллов SiC при нормальной температуре примесная.

Карбид кремния применяется для серийного выпуска варисторов (нелинейных резисторов), светодиодов, а также высокотемпературных

диодов, транзисторов, тензорезисторов, счетчиков частиц высокой энергии, способных работать в химически агрессивных средах.

2.8. Бинарные соединения

Среди бинарных соединений практическое применение находят соединения $A^{IV}B^{VI}$, $A^{III}B^{V}$.

Полупроводниковые соединения $A^{III}B^{V}$ являются ближайшими аналогами кремния и германия. Они образуются в результате взаимодействия элементов III подгруппы таблицы Менделеева (бора, алюминия, галлия, индия) с элементами V-б подгруппы (азотом, фосфором, мышьяком, сурьмой). Соединения $A^{III}B^{V}$ принято классифицировать по металлоидному элементу. Соответственно различают нитриды, фосфиды, арсениды и антимониды. Получают эти соединения или из расплава, который содержит элементы в равных атомных концентрациях, или из раствора соединения, имеющего в избытке элементы III группы, а также из газовой фазы. Кристаллы антимонидов, арсенидов галлия и индия обычно выращивают из расплава вытягиванием на затравку из-под инертного флюса. Слой жидкого прозрачного флюса, находящегося под давлением инертного газа, обеспечивает полную герметизацию тигля и подавляет испарение летучего компонента из расплава. Монокристаллы, полученные из расплава, обладают недостаточно высокой химической чистотой. Для очистки используются те же методы, что и для очистки германия и кремния.

Арсенид галлия среди соединений $A^{III}B^{V}$ занимает особое положение. Большая ширина запрещенной зоны (1,4 эВ), высокая подвижность электронов [$0,85 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$] позволяют создавать на его основе приборы, работающие при высоких температурах и высоких частотах.

Первым полупроводником являлся GaAs, на котором в 1962 г. был создан инжекционный лазер. Он используется для изготовления светодиодов, туннельных диодов, диодов Ганна, транзисторов, солнечных батарей и

других приборов. Для изготовления детекторов в инфракрасной области спектра, датчиков Холла, термоэлектрических генераторов, тензометров применяется антимонид индия, имеющий очень малую ширину запрещенной зоны (0,17 эВ) и очень высокую подвижность электронов [$7,7 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$].

Широкое применение в серийном производстве светодиодов нашел фосфид галлия, имеющий большую ширину запрещенной зоны (2,25 эВ). В отличие от других соединений группы A^mB^v чрезвычайно высокой чувствительностью к механическим напряжениям обладает антимонид галлия. Удельное сопротивление GaSb увеличивается в 2 раза при воздействии давления $4\text{-}10^8$ Па. При таком же давлении, приложенном к кристаллам GaAs и 1пР, их удельное сопротивление меняется лишь на 3 %. Благодаря высокой чувствительности к деформациям антимонид галлия используют при изготовлении тензометров.

К полупроводниковым соединениям A^IVB^{VI} относят халькогениды цинка, кадмия и ртути. Среди них можно выделить сульфиды, селениды и теллуриды.

Технология выращивания монокристаллов соединений A^IVB^{VI} разработана гораздо менее полно, чем технология полупроводников типа A^MB^V . Широкозонные полупроводники A^IVB^{VI} представляют собой в технологическом отношении +рудные объекты, так как обладают высокими температурами плавления и высокими давлениями диссоциации в точке плавления. Выращивание таких материалов в большинстве случаев осуществляется перекристаллизацией предварительно синтезированного соединения через паровую фазу в запаянных кварцевых ампулах.

Применяют соединения A^IVB^{VI} в большинстве случаев для создания промышленных люминофоров, фоторезисторов, высокочувствительных датчиков Холла и приемников далекого инфракрасного излучения.

Среди полупроводниковых соединений типа $A^{IV}B^{VI}$ наиболее изученными являются халькогениды свинца: PbS, PbSe, PbTe. Сульфид, селенид и теллур свинца в естественном состоянии встречаются в виде минералов галенита, клаусталита и алтаита. Первый минерал является одной из самых распространенных руд свинца, два других в природе обнаруживаются довольно редко. Монокристаллы PbS, PbSe, PbTe получают в основном в процессе осаждения из газовой фазы, методом выращивания из расплава или методом медленного охлаждения расплава с использованием естественного градиента температуры печи.

Эти соединения являются узкозонными полупроводниками. Халькогениды свинца используют для изготовления фоторезисторов в инфракрасной технике, инфракрасных лазеров, тензометров и термогенераторов, работающих в интервале температур от комнатной до 600 °С.

3. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Характерные свойства проводников и их зависимость от внешних условий

Проводниками называются вещества, внутри которых в случае электростатического равновесия электрическое поле равно нулю, т.е. нескомпенсированные заряды проводников локализируются в бесконечно тонком поверхностном слое, а если электрическое поле отлично от нуля, то в проводнике возникает электрический ток.

В качестве проводниковых материалов могут использоваться твердые тела, жидкости и газы. Среди твердых проводниковых материалов наиболее часто в электротехнике применяются металлы и сплавы.

По удельному электрическому сопротивлению ρ металлические проводниковые материалы можно разделить на две основные группы: металлы высокой проводимости, у которых при нормальной температуре $\rho <$

0,05 мкОм-м; металлы и сплавы с высоким сопротивлением, имеющие при тех же условиях $\rho > 0,3$ мкОм-м. Проводниковые материалы первой группы применяются в основном для изготовления обмоточных и монтажных проводов, жил кабелей различного назначения, шин и т.д. Проводниковые материалы второй группы используются при производстве резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т.п.

Особую группу составляют криопрободники и сверхпроводники - материалы, которые обладают ничтожно малым удельным электрическим сопротивлением при температурах, близких к абсолютному нулю.

К жидким проводникам относятся, как правило, расплавленные металлы и различные электролиты. Большинство металлов имеют достаточно высокую температуру плавления и поэтому являются жидкими проводниками при повышенных температурах. Среди металлов только ртуть, имеющая температуру плавления примерно -39°C , может быть использована как жидкий проводник при нормальной температуре.

В связи с тем что механизм электропроводности в металлах, как в твердом, так и в жидком состоянии обусловлен направленным движением свободных электронов под воздействием электрического поля, их принято называть *проводниками с электронной проводимостью* или *проводниками первого рода*. В проводниках второго рода или электролитах, к которым относятся растворы, (в том числе водные) кислот, щелочей и солей, прохождение тока связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов вещества в соответствии с законами Фарадея. При этом состав электролита постепенно изменяется, и на электродах выделяются продукты электролиза. Ионные кристаллы в расплавленном состоянии также являются проводниками второго рода.

Газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких значениях напряженности электрического поля не являются проводниками. При достижении некоторого критического значения напряженности

электрического поля, обуславливающего начало ударной и фотоионизации, газ становится проводником с электронной и ионной электропроводностью. Если газ сильно ионизирован, то при равенстве в единице объема числа отрицательно заряженных электронов и положительных ионов наблюдается особое состояние вещества, получившее название *плазма*.

К электрическим характеристикам проводниковых материалов можно отнести: удельную проводимость σ или обратную ей величину - удельное сопротивление ρ ; контактную разность потенциалов и термоэлектродвижущую силу (термоЭДС); работу выхода электронов из металла.

Удельная проводимость и удельное сопротивление проводников. Как указывалось выше, данные материалы обладают высокой проводимостью из-за наличия значительного количества свободных электронов, которая выражается в сименсах на метр (См/м) и может быть определена по формуле

$$\sigma = (q^2 n_0 \lambda) / (2m v_{\tau}), \quad (6.1)$$

где q - заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); n_0 - число свободных электронов в единице объема металла; λ - средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки; m - масса электрона; v_{τ} - средняя скорость теплового движения свободного электрона.

Факторы, влияющие на значение удельного сопротивления. Как уже отмечалось выше, удельное сопротивление металлов связано в основном с рассеянием энергии свободных электронов на дефектах

кристаллической решетки, где $\rho_{\text{тепл}}$ - удельное сопротивление, обусловленное в основном тепловыми колебаниями решетки; $\rho_{\text{ост}}$ - удельное сопротивление, вызванное наличием дефектов в кристаллической решетке к которым относятся примесные атомы, вакансии, дислокации, и тепловых колебаний собственных атомов. Поэтому удельное

$$\rho = \rho_{\text{тепл}} + \rho_{\text{ост}},$$

где $\rho_{\text{тепл}}$ - удельное сопротивление, обусловленное в основном тепловыми колебаниями решетки; $\rho_{\text{ост}}$ - удельное сопротивление, вызванное наличием дефектов в кристаллической решетке.

В области низких (криогенных) температур значение ρ почти не зависит от температуры и определяется только сопротивлением $\rho_{\text{ост}}$.

Характер зависимости ρ от температуры для большинства металлов резко изменяется при переходе из твердого состояния в жидкое.

При достижении температуры плавления (для меди она составляет 1083°C) увеличивается объем металла, т.е. уменьшается его Плотность, а вместе с ней и концентрация носителей. В результате сопротивление меди возрастает примерно в 2,4 раза. Для металлов, уменьшающих свой объем при плавлении (галлий, висмут, сурьма), значение удельного сопротивления имеет тенденцию к уменьшению.

Изменение удельного сопротивления металлического проводника с температурой принято характеризовать температурным коэффициентом удельного сопротивления ТК ρ или $\alpha_{\rho}(\text{K}^{-1})$.

К числу факторов, влияющих на удельное сопротивление металлических проводников, относится магнитное поле, под действием которого происходит искривление траектории движения электронов, что приводит к изменению электропроводности.

Металлические проводники и сплавы применяются в электротехнике обычно в виде проволоки различной формы и сечения, которая получается в процессе протяжки или волочения.

При деформации металла в холодном состоянии искажается кристаллическая решетка, что приводит также к увеличению удельного сопротивления. Устранить данное явление позволяет отжиг, в ходе которого

металл и сплав сначала нагреваются до высокой температуры, а затем медленно охлаждаются. В результате процесса рекристаллизации происходит восстановление искаженной структуры, и удельное сопротивление уменьшается.

2.2. Проводниковые материалы с высокой проводимостью

К проводниковым материалам с высокой проводимостью относятся различные металлы и сплавы - бронзы, латуни. Среди металлов особое место занимает серебро, медь, алюминий.

Серебро - металл белого цвета, один из наиболее дефицитных материалов, так как содержание его в земной коре составляет всего $7 \cdot 10^{-6} \%$. Среди всех проводниковых материалов серебро обладает минимальным удельным сопротивлением при нормальной температуре (см. табл. 6.1). Серебро, имеющее марку $\text{Ср}999-999,9$, должно содержать не более $0,1\%$ примесей. Механические характеристики серебра невысоки: твердость по Бринеллю составляет всего 25 (немного более золота), предел прочности при разрыве не превышает 200 МПа, а относительное удлинение при разрыве достигает 50%. По сравнению с другими благородными металлами (золотом, платиной) серебро имеет пониженную химическую стойкость, тенденцию диффундировать в материал подложки, на который оно нанесено. В условиях высокой влажности и при повышенных температурах процесс диффузии серебра в материал подложки значительно усиливается.

Серебро достаточно широко применяется в электротехнике и электронике, при производстве радиочастотных кабелей, работающих в диапазоне высоких частот, для защиты медных проводников от окисления при температурах выше $250 \text{ }^\circ\text{C}$, для изготовления электродов в производстве керамических и слюдяных конденсаторов, при изготовлении и применении контактов и т.д.

Поскольку потребление серебра систематически превышает производство первичного металла и восполнение его дефицита за счет вторичного, то необходимо соблюдать строгие меры по его экономии.

Медь - металл красноватого цвета, также очень дефицитный, так как его содержание в земной коре составляет не более $4,7 \cdot 10^{-3}\%$ (в верхней ее части примерно $2 \cdot 10^{-3}\%$). Этот металл получил широкое распространение в качестве проводникового материала, поскольку обладает целым рядом технически ценных свойств: малым удельным сопротивлением; достаточно высокой механической прочностью; удовлетворительной стойкостью к коррозии даже в условиях повышенной влажности; хорошей обрабатываемостью (легко прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку малого диаметра); хорошей способностью к пайке и сварке.

Наименьшим удельным сопротивлением обладает химически чистая медь. Наличие примесей в меди отрицательно влияет не только на ее механические и технологические свойства, но и значительно снижает электропроводность. Наиболее нежелательными примесями являются висмут и свинец, которые почти нерастворимы в меди и образуют легкоплавкую эвтектику, которая при кристаллизации меди располагается вокруг зерен. Даже тысячные доли процента висмута и сотые доли процента свинца приводят к тому, что медь при обработке давлением при температуре $850 \dots 1150^\circ\text{C}$ растрескивается. Наличие серы приводит к уменьшению пластичности. Такая медь при низких температурах становится хрупкой. Очень вредно присутствие в составе меди и кислорода, который способствует образованию оксида и закиси меди, вызывающих повышение удельного сопротивления.

Медь по химическому составу подразделяется на несколько марок: М1, М00к, М0к, М0ку, М00б, М0б, М1б, М1у, М1к, М1ф, М1р. к, ку - катодная медь, б - бескислородная, у - катодная переплавленная, р и ф - раскисленная, цифры 00, 0 и 1 отражают содержание меди. Максимальное содержание меди имеют марки М00к и М00б.

Содержание меди вместе с серебром в этих марках составляет 99,9...99,99%. Медь марки М1ф с повышенным содержанием фосфора (0,012...0,06%), снижающим электропроводность, для изготовления проводников не используется. В производстве проводов не применяется также и медь марки М1р, которая раскислена фосфором и содержит его в количестве 0,002...0,012%. Данная медь может быть использована при изготовлении других типов кабельной продукции, например некоторых видов лент.

В нормальных атмосферных условиях медь достаточно устойчива к коррозии, так как ее химическая активность невелика. В сухом и влажном воздухе, пресной воде при температуре 20 °С медь не окисляется. Незначительная коррозия имеет место только в соленой воде. В присутствии влаги и углекислого газа на поверхности меди образуется, как правило, зеленая пленка основного карбоната. При нагревании меди до температуры 200 °С идет медленное ее окисление с образованием защитной пленки оксида меди CuO . Интенсивное окисление меди начинается при температуре выше 225 °С.

Механические и электрические характеристики проводниковой меди существенно зависят от ее состояния. Например, твердотянутая медь марки МТ имеет меньшую проводимость и относительное удлинение перед разрывом, но большую механическую прочность и твердость, чем отожженная медь марки ММ. Твердость по Бринеллю при температуре 20 °С для меди марки МТ в зависимости от степени нагартовки составляет 65...120, а для меди марки ММ - не более 35. Заметное влияние на указанные характеристики меди оказывает температура. При нагревании (особенно выше 200 °С) в результате процесса рекристаллизации механические характеристики и удельное сопротивление меди резко изменяются. В соответствии с механическими и электрическими характеристиками проводниковой меди формируются и области ее применения.

Мягкая (отожженная) медь, удельное сопротивление которой при температуре 20 °С не должно превышать 0,01724 мкОм-м, в виде проволок различного сечения и формы применяется, как правило, для изготовления токопроводящих жил кабелей различного назначения, обмоточных и монтажных проводов, в производстве волноводов и т.д. Ленточная медь широко используется при экранировании кабелей связи и радиочастотных кабелей. Твердая (холоднотянутая) медь, удельное сопротивление которой должно быть не более 0,0180 мкОм-м, применяется в основном тогда, когда необходимо обеспечить высокую механическую прочность, твердость, сопротивляемость истирающим нагрузкам и упругость. Такие требования к меди предъявляются при изготовлении контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин и пр.

Поскольку медь является сравнительно дорогим и дефицитным материалом, расходование ее ведется весьма экономно и при возможности ее заменяют другими, менее дефицитными металлами.

Алюминий - металл, занимающий второе место по значению (после меди) среди проводниковых материалов и наиболее распространенный в природе, поскольку его содержание в земной коре не менее 7,5%.

Широкое распространение в электротехнике этот металл получил не только ввиду острого дефицита меди, но и благодаря своим замечательным свойствам. Алюминий, обладая большим сродством с воздухом, легко окисляется на воздухе, покрываясь при этом прочной оксидной пленкой, которая защищает металл от дальнейшего окисления и обуславливает его высокую коррозионную стойкость. На него не действуют водяной пар, пресная и морская вода. В обычных условиях алюминий слабо реагирует с концентрированной азотной кислотой. Однако при нагревании он растворяется в разбавленной серной и азотной кислотах, легко растворяется в щелочах, образуя при этом алюминаты с выделением водорода.

По отношению к большинству металлов алюминий имеет отрицательный электрохимический потенциал и, находясь в контакте с ними, образует гальванические пары, что в присутствии влаги способствует развитию электрохимической коррозии. Поскольку оксидная пленка обладает электроизоляционными свойствами, в месте контакта проводов создается достаточно большое переходное сопротивление, которое затрудняет пайку алюминия обычными методами. Для этой цели приходится использовать специальные припои и паяльники (ультразвуковые) или применять холодную сварку, т.е. пластическое обжатие проводов в месте их контакта.

Присутствие примесей в составе алюминия, среди которых наиболее часто встречаются железо, кремний, медь, цинк и титан, существенно снижают его удельную проводимость, влияют на механические характеристики и обуславливают области его применения.

В соответствии с количественным содержанием контролируемых примесей отечественная промышленность выпускает алюминий особой чистоты (не более 0,001%), высокой чистоты (не более 0,05%) и технической чистоты (не более 1,0%). Марка алюминия начинается с буквы А, затем стоит цифра, определяющая процентное содержание алюминия, например алюминий марки А97 содержит 99,97% алюминия, остальное - контролируемые примеси. Для электротехнических целей используются специальные марки алюминия А5Е и А7Е, в которых содержание железа и кремния находится в определенном соотношении, а содержание титана, ванадия, хрома и марганца снижено до тысячных долей процента.

В отожженном состоянии такой алюминий имеет предел прочности при растяжении 80...90 МПа, относительное удлинение 25...33%, а твердость по Бринеллю 15...20. Удельное электрическое сопротивление проводникового алюминия не должно превышать 0,0289 мкОм-м.

Холодная деформация алюминия и наличие примесей увеличивают твердость и прочность металла, снижают относительное удлинение и его проводимость.

Проводниковый алюминий используется для изготовления токопроводящих жил обмоточных, монтажных и установочных проводов, а также неизолированных проводов для воздушных линий электропередачи, прессованных жил кабелей различного назначения и т.д. Для этих же целей может использоваться алюминий специальных марок А75К, А8К и А8КУ, в которых суммарное содержание примесей Ti + V + Mg + Cr уменьшено по сравнению с марками А7 и А8.

Сплавы алюминия отличаются легкостью и повышенной механической прочностью по сравнению с алюминием. В состав алюминиевых сплавов кроме алюминия могут входить марганец, цинк, магний, медь, железо и кремний, причем содержание железа и кремния в составе сплава не должно превышать 0,7 и 0,3% соответственно.

В марках алюминиевых сплавов буквы дают информацию о том, какие именно элементы содержатся в сплаве (А - алюминий, К - кремний, М - медь, Mg - магний, Ц - цинк, Мц - марганец), а цифры - их среднее процентное содержание.

Свойства сверхпроводников и криопроводников. Явление сверхпроводимости было открыто нидерландским физиком Х.Камерлинг-Оннесом в 1911 г. Согласно современной теории, основные положения которой были развиты в работах Д.Лардина, Л.Купера, Дж.Шриффера (теория БКШ), явление сверхпроводимости металлов можно объяснить следующим образом. При температурах, близких к абсолютному нулю, меняется характер взаимодействия электронов между собой и атомной решеткой, так что становится возможным притягивание одноименно заряженных электронов и образование так называемых электронных (*куперовских*) пар.

Поскольку куперовские пары в состоянии сверхпроводимости обладают большой энергией связи, обмена энергетическими импульсами между ними и решеткой нет. При этом сопротивление металла становится равным нулю. С увеличением температуры некоторая часть электронов термически возбуждается и переходит в одиночное состояние, характерное для обычных металлов. При достижении критической температуры T_c все куперовские пары распадаются и состояние сверхпроводимости исчезает.

Аналогичный результат наблюдается при определенном значении магнитного поля (критической напряженности $H_{кр}$ или критической индукции $B_{кр}$), которое может быть создано собственным током и посторонними источниками. Критическая температура и критическая напряженность магнитного поля являются взаимосвязанными величинами (для чистых металлов):

$$H_{кр} = H_0 (1 - T_{кр} / T_0)^2, \quad (6.9)$$

где H_0 - критическая напряженность магнитного поля при абсолютном нуле; T_0 - критическая температура при отсутствии магнитного поля.

Следовательно, если идеальный сверхпроводник поместить в магнитное поле, то некоторой температуре $T_{кр1} < T_0$ будет соответствовать определенное значение критической напряженности магнитного поля $H_{кр1}$. При температуре $T_{кр1}$ сверхпроводящее состояние исчезает. $H > H_{кр1}$

Известно 35 сверхпроводниковых металлов и более 1000 сверхпроводниковых сплавов и химических соединений различных элементов. Установлены также сверхпроводящие свойства у некоторых полупроводников, например антимонида индия InSb, серы, ксенона и пр. Для многих проводниковых материалов, таких как серебро, медь, золото, платина, даже при очень низких температурах достичь сверхпроводящего состояния пока не удалось.

По физико-химическим свойствам элементарные сверхпроводники (чистые металлы) можно разделить на мягкие (Hg, Sn, Pb, In) и жесткие (Ta, Ti, Zr, Nb).

Для *мягких* сверхпроводников характерны низкие температуры плавления и отсутствие внутренних механических напряжений, *жесткие* сверхпроводники отличаются наличием значительных внутренних напряжений.

С позиций термодинамики сверхпроводниковые материалы принято делить на сверхпроводники I, II и III родов.

Для сверхпроводников I рода характерны скачкообразное изменение удельной теплоемкости и определенная температура перехода в сверхпроводящее состояние, которое может разрушиться уже при малых критических температурах и напряженности магнитного поля примерно 1 кА/м, что затрудняет их использование. У таких материалов наблюдается эффект Майснера-Оксенфельда, заключающийся в том, что при переходе образца в сверхпроводящее состояние магнитное поле выталкивается из него, т.е. он становится идеальным диамагнетиком.

Сверхпроводники II рода отличаются тем, что переход в сверхпроводящее состояние у них осуществляется не скачком, а постепенно. Для них характерны два критических значения магнитной индукции при температуре $T_{кр} < T_0$. Если магнитная индукция во внешнем поле начинает превышать значение нижней критической индукции, то происходит частичное проникновение магнитного поля во всю толщину сверхпроводящего образца. При этом под действием силы Лоренца электроны в сверхпроводнике начинают двигаться по окружностям, образуя так называемые *вихри*. Внутри вихря скорость вращения возрастает по мере приближения к оси до тех пор, пока не достигнет критического значения и не произойдет «срыв» сверхпроводимости. По мере увеличения внешнего магнитного поля количество вихрей возрастает, а расстояние между ними

сокращается. Когда оно становится соизмеримым с размером куперовской пары, весь объем переходит в нормальное состояние и магнитное поле полностью проникнет в образец.

К сверхпроводникам II рода из чистых металлов можно отнести только ниобий Nb, ванадий V и технеций Tc. Сверхпроводники III рода включают в себя неидеальные сверхпроводники II рода (жесткие сверхпроводники). Для них характерно наличие крупных неоднородностей, возникающих при выделении другой фазы или пластичном деформировании. Дефекты структуры могут служить узлами закрепления вихрей (явление *пиннинга*), что значительно повышает допустимые токи. Например, по проволоке из станнида ниобия Nb₃Sn в полях с индукцией примерно 10 Тл можно пропускать ток с плотностью выше 10⁹ А/м². При частотах не более 10 кГц потери в этих материалах носят гистерезисный характер и не зависят от формы тока. На частотах 10... 100 Гц кристаллическая плотность переменного тока мало зависит от частоты и по амплитуде приближается к критической плотности постоянного тока.

К сверхпроводникам III рода относятся в основном сплавы и химические соединения.

Высокотемпературные сверхпроводники. В 1986 г. было обнаружено, что такие вещества, как $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$ (M = Ba, Sr), переходят в сверхпроводящее состояние при температуре, близкой к температуре жидкого азота. Позже в сплавах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ переход в сверхпроводящее состояние происходил при температуре -173°C и выше. Такие вещества, названные *высокотемпературными сверхпроводниками*, обладают структурой типа перовскита (природный минерал CaTiO_3) и представляют собой керамику с характерным расположением атомов. Получают такие материалы в процессе спекания тонкоизмельченной смеси оксидов иттрия, меди с карбонатом бора. Полученный таким способом образец сверхпроводящей керамики состоит из двух фаз (соединений). Одна фаза изумрудно-зеленого цвета,

прозрачная и содержит ионы иттрия, бария и меди в соотношении 2 : 1 : 1. Другая фаза черного цвета, непрозрачная, содержит большее количество меди. Соотношение иттрия, бария и меди в ней 1 : 2 : 3. Именно эта фаза и обладает сверхпроводящими свойствами.

Сверхпроводниковые материалы получили достаточно широкое применение в различных областях науки и техники. Их используют для создания сверхсильных магнитных полей в достаточно большой области пространства; для изготовления обмоток электрических машин и трансформаторов, обладающих малой массой и размерами, но очень высоким КПД, сверхпроводящих кабелей для мощных линий передачи энергии, волноводов с очень малым затуханием, мощных накопителей электрической энергии, устройств памяти и управления. Эффект Майснера-Оксеифельда, наблюдаемый в сверхпроводниках, используется для создания опор без трения и вращающихся электрических машин с КПД, равным почти 100%. Явление *сверхпроводящего подвеса (левитации)* применяется в гироскопах и в поездах сверхскоростной железной дороги и т. д.

Криопроводники. К их числу относятся материалы, которые при сильном охлаждении (ниже $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$) приобретают высокую электрическую проводимость, но не переходят в сверхпроводящее состояние. Это объясняется тем, что при низкой температуре удельное сопротивление проводника обусловлено, как правило, наличием примесей и физическими дефектами решетки. Поскольку составляющая удельного сопротивления, обусловленная рассеиванием энергии за счет тепловых колебаний решетки, пренебрежимо мала, для криопроводников необходимо применять хорошо отоженный металл высокой чистоты, который обладает минимальным удельным сопротивлением в рабочем диапазоне температур от -240 до $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Минимальным сопротивлением при температуре жидкого азота, самого дешевого хладагента, обладает бериллий. Однако он отличается плохой тех-

нологичностью, дорог, высокотоксичен, особенно в пылевидном состоянии. У бериллия сильно выражен магниторезистивный эффект. Использование алюминия в качестве криопроводящего материала более рационально, так как он более доступен, дешевле и имеет низкие значения удельного электрического сопротивления в рабочем диапазоне температур. Например, алюминий марки А999, содержащий примесей не более 0,001%, при температуре жидкого гелия имеет удельное сопротивление не более $(1 \dots 2) \cdot 10^{-6}$ мкОм-м.

Криопроводники применяются в основном для изготовления токопроводящих жил кабелей и проводов, работающих при температурах жидких водорода ($-252,6^{\circ}\text{C}$), неона ($-245,7^{\circ}\text{C}$) и азота ($-195,6^{\circ}\text{C}$).

Контактные материалы. *Электрическим контактом* называют поверхность соприкосновения токоведущих частей электротехнических устройств, а также конструктивные приспособления, обеспечивающие такой контакт. По принципу работы контакты разделяются на неподвижные, размыкаемые и скользящие.

К *неподвижным* контактам относятся цельнометаллические (сварные или паяные) зажимные (болтовые, винтовые) соединения. Цельнометаллические соединения должны отличаться не только механической прочностью, но и обеспечивать стабильный электрический контакт с малым переходным сопротивлением. Качество зажимного контакта определяется в основном контактным нажатием и способностью материала к пластической деформации. В связи с этим такие контактные поверхности целесообразно покрывать мягкими коррозионно-стойкими металлами (оловом, серебром, кадмием и др.).

Размыкающие контакты обеспечивают периодическое замыкание и размыкание электрической цепи. Более ответственная их функция предопределяет и более строгие требования к ним: устойчивость против коррозии, стойкость к свариванию и действию электрической эрозии,

стойкость к действию сжимающих и ударных нагрузок, высокие проводимость и теплофизические свойства, хорошая технологичность и способность «прирабатываться» друг к другу.

В качестве контактных материалов для слаботочных размыкающих контактов кроме чистых тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена) применяются благородные металлы (платина, золото, серебро), а также различные сплавы на их основе (золото-серебро, платина-рутений, платина-родий), металлокерамические композиции (например, Ag-CdO).

Сильноточные размыкающие контакты изготавливаются, как правило, из металлокерамических материалов, которые получают методом порошковой металлургии. Они включают в себя композиции на основе меди и серебра: серебро - оксид кадмия, серебро- оксид меди, медь-графит, серебро-никель, серебро-графит. Используются также и тройные композиции: серебро-никель-графит, серебро-вольфрам-никель, медь-вольфрам-никель. Медная и серебряная фазы в этих композициях обеспечивают высокую электро- и теплопроводность контакта, а включения тугоплавкой фазы придают контактам стойкость к механическому износу, электрической эрозии и свариваемости.

Для изготовления сильноточных контактов, работающих при повышенных напряжениях и контактных нажатиях, способных пробить или разрушить механически оксидную пленку на контактной поверхности, рекомендуется использовать твердую медь, что значительно удешевляет электротехническое устройство.

Скользящие контакты должны дополнительно отличаться высокой стойкостью к истирающим нагрузкам, которые особенно велики при сухом трении, т.е. когда оба контакта изготовлены из одного материала, а также при неудачном выборе пар. Наиболее высокими качествами обладают контактные пары, составленные из металлического и графитосодержащего материалов. Кроме низкого коэффициента трения графит и материалы на его

основе отличаются большим напряжением дугообразования, поэтому износ контактов от искрения незначителен. На поверхности графита не образуются оксидные пленки, и контакт имеет линейную вольт-амперную характеристику.

Широкое применение для изготовления скользящих контактов нашли также проводниковые бронзы и латуни, отличающиеся высокой механической прочностью, стойкостью к истирающим нагрузкам, упругостью, антифрикционными свойствами и стойкостью к атмосферной коррозии (например, ЛС59-1, ЛМц58-2, БрКд1, БрБ2 и т.д.). Для изготовления коллекторных пластин часто используются твердая медь, а также медь, легированная серебром, и другие материалы.

Металлокерамика достаточно широко применяется в электротехнике. Этот материал применяется для изготовления контактов круглой, прямоугольной и сложной формы методом порошковой металлургии. Композиции получаются в процессе трехфазного спекания спрессованных из порошков заготовок или пропиткой серебром или медью предварительно спрессованных пористых каркасов из вольфрама или вольфрамоникелевого сплава. Удельное электрическое сопротивление металлокерамических контактов должно быть не более 0,07 мкОм-м при температуре 20°C, отличаться высокой стабильностью во времени и малой зависимостью от условий эксплуатации.

Хорошие магнитные свойства некоторых металлокерамических композиций позволили их использовать для изготовления постоянных магнитов методом прессования порошка, состоящего из измельченных тонкодисперсных магнитотвердых сплавов, с последующим спеканием при высоких температурах. В результате такой технологии изделия получают достаточно точных размеров и не требуют дальнейшей обработки. Металлокерамические магниты имеют высокую механическую прочность, но пониженные магнитные свойства по сравнению с литыми магнитами, что

обусловлено в основном большим содержанием (до 30%) немагнитного связующего вещества.

Отечественная промышленность выпускает одиннадцать марок металлокерамических магнитов (МК1-МК11), у которых коэрцитивная сила может быть 24... 128 кА/м, остаточная индукция 0,48... 1,1 Тл, а запасенная магнитная энергия не более 3... 16 кДж/м³.

Экономическая эффективность металлокерамических композиций, обладающих магнитными свойствами, существенно возрастает при массовом автоматизированном производстве магнитов небольших размеров и сложной формы.

Электротехнический уголь относится к твердым неметаллическим проводниковым материалам, и сырьем для его производства могут быть сажа, графит, антрацит. Для получения монолитного изделия используются связующее вещество (каменноугольная смола или жидкое стекло) и обжиг при высоких температурах (800... 3000 °С). Режим обжига определяет в основном форму, в которой углерод будет находиться в изделии. При высоких температурах (2000...3000°С) происходит переход углерода в графит, поэтому такой процесс получил название *графитирование*.

Электротехнический уголь широко применяется для изготовления щеток электрических машин, электродов для прожекторов, дуговых электрических печей и электролитических ванн, анодов гальванических элементов. Угольные порошки, изготовленные из антрацита, используются в микрофонах для создания сопротивления, значение которого изменяется в зависимости от приложенного к нему давления.

Используется уголь также и при изготовлении непроволочных высокоомных резисторов, различных разрядников для телефонных сетей, электровакуумных приборов.

Композиции на основе сажи и графита используются для экранирования жил силовых кабелей, добавляются в состав резиновых смесей для

повышения механических характеристик резины, а также стойкости к световому и тепловому старению, некоторым агрессивным средам.

Сплавы для термопар. Для термопар, принцип действия которых изложен ранее, наиболее широко применяются следующие сплавы: копель (56% Си и 44% Ni), алюмель (95% Ni, остальное - Al, Si и Mg), хромель (90% Ni и 10% Cr), платинородий (90% Pt и 10% Rh), константан (60% Си и 40% Cr). Материалы, образующие термопару, подбираются таким образом, чтобы в диапазоне измеряемых температур они обладали максимальным значением термоЭДС. При этом погрешность в определении температуры существенно снижается. Согласно этому условию, для измерения температуры могут применяться следующие термопары: медь - константан и медь - копель (до 350°C); железо - константан, железо - копель и хромель - копель (до 600°C); хромель - алюмель (до 900... 1000°C); платинородий - платина (до 1600°C).

Знак термоЭДС у термопар зависит от направления тока в холодном и горячем спаях. Принято считать, что в холодном спаяе ток идет от первого названного в паре материала ко второму (т. е. от хромеля к копелю, от платинородия к платине), а в горячем спаяе - наоборот.

Некоторые полупроводниковые материалы (например, тройной сплав Bi-Sb-Zn) тоже обладают значительными коэффициентами термоЭДС, что позволяет с успехом использовать их для изготовления термоэлементов, термогенераторов, холодильных устройств и пр.

2.3. Материалы с большим удельным сопротивлением

К таким материалам относятся сплавы, имеющие при нормальных условиях удельное электрическое сопротивление не менее 0,3 мкОм·м. Эти материалы достаточно широко применяются при изготовлении различных электроизмерительных и электронагревательных приборов, образцовых сопротивлений, реостатов и т.д.

Для изготовления электроизмерительных приборов, образцовых сопротивлений и реостатов применяются, как правило, сплавы, отличающиеся высокой стабильностью удельного сопротивления во времени и малым температурным коэффициентом сопротивления.

Манганин - это медно-никелевый сплав, содержащий в среднем 2,5...3,5% никеля (с кобальтом), 11,5... 13,5% марганца, 85,0...89,0% меди. Содержание примесей в нем, среди которых главным является железо, не должно превышать 0,9%. Легирование марганцем, а также проведение специальной термообработки при температуре 400 °С позволяет стабилизировать удельное сопротивление манганина в интервале температур от -100 до +100°С. Манганин имеет очень малое значение термоЭДС в паре с медью, высокую стабильность удельного сопротивления во времени, что позволяет широко использовать его при изготовлении резисторов и электроизмерительных приборов самых высоких классов точности.

Константан содержит те же компоненты, что и манганин, но в иных соотношениях: никель (с кобальтом) 39... 41%, марганец 1 ...2%, медь 56,1 ...59,1%. Содержание примесей также должно быть не более 0,9%. Название сплава свидетельствует о независимости его удельного электрического сопротивления от температуры, поскольку абсолютное значение коэффициента удельного сопротивления этого сплава не превышает $2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. По нагревостойкости константан превосходит манганин, что позволяет использовать его в реостатах и нагревательных элементах, работающих при температуре до 500 °С. Высокие механические характеристики, сочетающиеся с пластичностью, позволяют изготавливать из этого сплава тончайшую проволоку, ленты, полосы и фольгу. Высокое значение термоЭДС в паре с медью и железом исключает применение константана в электроизмерительных приборах высокой точности, но он с успехом используется при изготовлении термопар. Наличие в составе константана достаточно большого количества дорогого и дефицитного никеля ограничивает его использование в изделиях массового производства.

Нихромы - сплавы на основе железа, содержащие в зависимости от марки 15...25% хрома, 55...78% никеля, 1,5% марганца. Они в основном применяются для изготовления электронагревательных элементов, так как обладают хорошей стойкостью при высокой температуре в воздушной среде, что обусловлено близкими значениями температурных коэффициентов линейного расширения этих сплавов и их оксидных пленок. Длительность работы электронагревательных элементов из нихрома существенно повышается при исключении доступа кислорода к поверхности проволоки. Нихромы имеют высокую технологичность, легко протягиваются в тонкую проволоку или ленту, значительное содержание никеля в составе нихромов обуславливает их повышенную стойкость и ограничивает области применения.

В некоторых случаях для изготовления реостатов, контактных пружин и других электротехнических изделий применяется медно- никелевый сплав нейзильбер МНЦ-15-20, в составе которого 18...22% цинка, 13,5... 16,5% никеля (с кобальтом) и остальное - медь. Содержание в нем различных примесей не должно превышать 0,9%. Нейзильбер, внешне напоминающий серебро (чем и объясняется его название), имеет очень высокие механические характеристики, пластичен, но удельное электрическое сопротивление его меньше, чем у других сплавов. Он имеет высокую коррозионную стойкость и благодаря значительному содержанию цинка в своем составе - меньшую стоимость по сравнению с константаном.

Среди сплавов с высоким сопротивлением, которые (кроме нихрома) широко используются для изготовления различных нагревательных элементов, необходимо отметить жаростойкие сплавы фехрали и хромали. Они относятся к системе Fe-Cr-Al и содержат в своем составе 0,7% марганца, 0,6% никеля, 12... 15% хрома, 3,5...5,5% алюминия и остальное - железо. Эти сплавы отличаются высокой стойкостью к химическому разрушению поверхности под воздействием различных газообразных сред при высоких температурах; имеют удовлетворительные технологические свойства и

хорошие механические характеристики, приведенные ниже, что позволяет достаточно легко получать из них проволоку, ленты, прутки и другие полуфабрикаты, которые способны свариваться и выдерживать большие механические нагрузки при высокой температуре без существенных деформаций.

Для обозначения марок хромалюминиевых сплавов используется традиционная система из букв и чисел, отличающаяся только тем, что для обозначения алюминия используется буква Ю. Например, обозначение Х23Ю5 соответствует сплаву с содержанием 23% хрома и 5% алюминия.

3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Общие сведения

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает магнитный момент. Намагничивание вещества характеризуют: магнитная индукция B (Тл), напряженность магнитного поля H (А/м), намагниченность J (А/м), магнитная восприимчивость k_m , магнитная проницаемость μ , магнитный поток Φ (Вб).

Намагниченность связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$J = k_m H. \quad (7.1)$$

Магнитная индукция в веществе определяется суммой индукции внешнего и собственного магнитных полей:

$$B = B_0 + B_{\text{вн}} = \mu_0 H + \mu_0 J = \mu_0 (H + J), \quad (7.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитная постоянная, Гн/м. Объединяя выражения (7.1) и (7.2), получим

$$B = \mu_0 H(1 + k_m) = \mu_0 \mu_r H, \quad (7.3)$$

где $\mu_r = 1 + k_m$ или $\mu_r = B/(\mu_0 H)$ - относительная магнитная проницаемость (в дальнейшем магнитная проницаемость).

В соответствии с магнитными свойствами все материалы делятся на диамагнитные (диамагнетики), парамагнитные (парамагнетики), ферромагнитные (ферромагнетики), антиферромагнитные (антиферромагнетики), ферримагнитные (ферримагнетики).

Диамагнетизм имеется во всех веществах и связан с тем, что внешнее магнитное поле оказывает влияние на орбитальное движение электронов, вследствие чего индуцируется магнитный момент, направленный навстречу внешнему полю. После снятия внешнего магнитного поля индуцированный магнитный момент диамагнетика исчезает. Магнитная восприимчивость диамагнетиков k_d (отрицательная) по абсолютному значению очень мала и не зависит от температуры и напряженности магнитного поля.

К *диамагнитным* веществам относятся инертные газы, водород, медь, цинк, свинец (вещества, состоящие из атомов с полностью заполненными электронными оболочками).

Парамагнитные вещества отличаются тем, что состоят из атомов с не полностью заполненными оболочками, т.е. обладающих магнитными моментами. Но такие атомы находятся друг от друга достаточно далеко, и взаимодействие между ними отсутствует. Поэтому у парамагнетиков магнитные моменты атомов ориентируются в направлении внешнего магнитного поля и усиливают его. Магнитная восприимчивость парамагнетиков положительна, имеет небольшое значение (от 10^{-5} до 10^{-2}) и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля, но зависит от температуры.

Ферромагнитные вещества содержат атомы, обладающие магнитным моментом (незаполненные электронные оболочки), однако расстояние между ними не так велико, как в парамагнетиках, в результате чего между атомами возникает взаимодействие, которое называется *обменным* (предполагается, что соседние атомы обмениваются электронами). В результате такого взаимодействия энергетически выгодным в зависимости от расстояния

становится параллельная ориентация магнитных моментов соседних атомов (ферромагнетизм) либо антипараллельная (антиферромагнетизм).

Под действием обменных сил параллельная ориентация магнитных моментов атомов ферромагнитного вещества происходит в определенных областях, называемых *доменами*. В пределах домена материал в отсутствие внешнего поля намагничен до насыщения благодаря обменному взаимодействию отдельных атомов. Это взаимодействие длится только до определенной критической температуры, которая называется *температурой Кюри*. Выше температуры Кюри домены разрушаются, и ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние. Ферромагнитные вещества легко намагничиваются в слабых магнитных полях. Магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость ферромагнетиков велики (до 10^6) и сильно зависят от температуры, а также от напряженности магнитного поля.

Необходимым условием существования ферромагнетизма считается наличие кристаллической решетки, однако известны аморфные ферромагнетики.

Антиферромагнетиками называют материалы, в которых во время обменного взаимодействия соседних атомов происходит антипараллельная ориентация их магнитных моментов. Так как магнитные моменты соседних атомов взаимно компенсируются, антиферромагнетики не обладают магнитным моментом, а характеризуются магнитной восприимчивостью, которая близка к восприимчивости парамагнетиков. При температуре выше некоторой критической, которая получила название *температуры Нееля* (аналогична температуре Кюри), магнитоупорядоченное состояние антиферромагнетика разрушается, и он переходит в парамагнитное состояние.

К *ферромагнетикам* относят вещества, в которых обменное взаимодействие осуществляется не непосредственно между магнитоактивными атомами, как в случае ферромагнетизма, а через немагнитный ион

кислорода. Такое взаимодействие называют *косвенным обменным* или *сверхобменным*. Это взаимодействие в большинстве случаев в ферромагнитных веществах приводит к антипараллельной ориентации магнитных моментов соседних ионов (т.е. к антиферромагнитному упорядочению). Однако количество ионов с магнитными моментами, ориентированными условно вверх и вниз, а также их моменты могут быть неодинаковыми. Поэтому магнитные моменты ионов не полностью компенсируются, и ферромагнитные вещества обладают магнитным моментом и имеют доменную структуру, которая исчезает выше температуры Кюри.

Диа-, пара- и антиферромагнитные вещества относятся к слабомагнитным, ферро- и ферромагнитные вещества являются сильномагнитными. В качестве магнитных материалов технического применения в электротехнике находят ферромагнитные и ферромагнитные вещества.

4.2 Процессы технического намагничивания и переманничивания магнитных материалов

В ферромагнитных материалах реализуется такая доменная структура, для которой полная свободная энергия системы является минимальной. Полная свободная энергия состоит из следующих основных видов энергий: магнитостатической, магнитной анизотропии, магнитострикции, обменной. Минимум магнитостатической энергии, связанной с полями рассеивания или с возникновением полюсов на концах магнита, имеет место в том случае, когда магнитный поток замкнут внутри материала. Однодоменное состояние является невыгодным, так как приводит к возникновению магнитных полюсов, которые создают внешнее поле (поле рассеивания). Магнитостатическая энергия уменьшается, если тело состоит из нескольких доменов, и становится равной нулю при образовании замыкающих доменов

(рис. 4.1), магнитный поток замкнут внутри тела, за его пределами магнитное поле равно нулю.

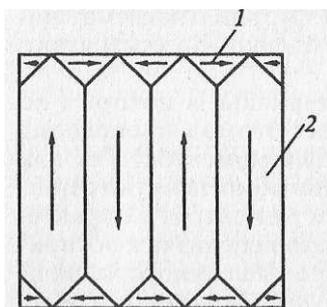


Рис. 7.1. Доменная структура магнитных материалов:
1 – замыкающие домены;
2 – основные домены

Деление образца на домены ограничивается энергией, затрачиваемой на образование границ между доменами. Линейный размер доменов от 10^{-2} до 10^{-5} см. Толщина доменной границы достигает нескольких сотен нанометров. При действии внешнего магнитного поля происходит рост объема доменов, которые имеют направление намагниченности, совпадающее или близкое к направлению напряженности поля. Зависимость магнитной индукции ферромагнитного вещества от напряженности внешнего поля называют *основной кривой намагничивания* (рис. 4.2).

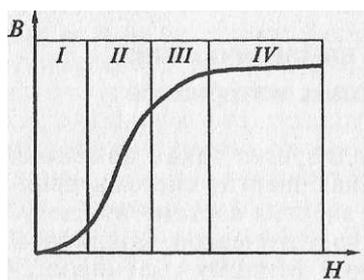


Рис. 7.2. Основная кривая намагничивания ферромагнетика

Ее можно разделить на несколько участков, которые характеризуются определенными процессами намагничивания для ферромагнетиков. В области слабых полей (область I) магнитная восприимчивость и проницаемость не изменяются. Изменение магнитной индукции в этой области происходит в основном из-за обратимых процессов, которые обусловлены смещением границ доменов.

Кривая намагничивания в области *II* характеризуется тем, что происходит неупругое смещение границ доменов, т.е. процесс не является обратимым. В области приближения к насыщению (область *III*) изменение индукции объясняется в основном процессом вращения, когда направление вектора намагниченности самопроизвольных областей приближается к направлению внешнего поля. Полная ориентация намагниченности по полю соответствует техническому насыщению (конец области *III*). Последний участок кривой индукции (область *IV*) соответствует слабому росту индукции с увеличением напряженности поля. В этом случае увеличение индукции происходит благодаря росту намагниченности домена, т.е. ориентации спиновых моментов отдельных электронов, направление которых не совпадает с направлением внешнего поля вследствие дезориентирующего влияния теплового движения.

Используя основную кривую намагничивания можно определить различные виды магнитной проницаемости (рис. 4.2 и 4.3). Различают абсолютную $\mu_a = B/H$ и относительную $\mu = B/\mu_0 H$ магнитные проницаемости. Подставляя реальные значения B и H в эти соотношения, можно получить различные виды магнитной проницаемости, используемые в технике для характеристики магнитных материалов. В электротехнике часто пользуются начальной $\mu_{нч}$, определяемой экспериментально в полях и равной примерно 0,1 А/м, максимальной μ_{max} и дифференциальной $\mu_{диф}$ магнитными проницаемостями. Начальная и максимальная магнитные проницаемости определяются как тангенсы угла наклона основной кривой намагничивания на участках *I* и *III* кривой намагничивания (см. рис. 4.2 и 4.3):

$$\mu_{rn} = \lim \Delta B / \mu_0 \Delta H = \operatorname{tg} \alpha_{\text{нач}};$$

$$\mu_{\text{max}} = B_{\text{max}} / \mu_0 H_{\text{max}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{max}}.$$

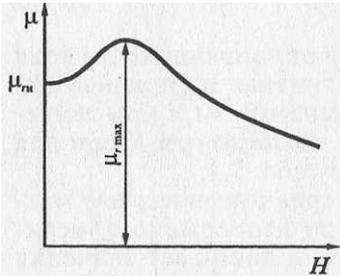


Рис. 7.4. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля

Дифференциальная проницаемость пропорциональна тангенсу угла наклона касательной к основной кривой намагничивания в любой точке и осью абсцисс:

$$\mu_{\text{диф}} = dB / \mu_0 dH.$$

(7. 6)

означает, что кривые $B = f(H)$ при увеличении и уменьшении напряженности поля не тождественны вследствие явления гистерезиса.

Значение индукции насыщения принято определять в поле H_s для ферромагнитных веществ это значение принимается равным $5H_c$. Кривая изменения индукции при изменении напряженности внешнего магнитного поля от $+H_s$ до $-H_s$ и обратно называется *предельной петлей гистерезиса*. Она является важной характеристикой материала, поскольку позволяет

определить основные параметры материала - коэрцитивную силу H_c , индукцию насыщения B_s , остаточную индукцию B_r и др.

Поликристаллические материалы не имеют ярко выраженных осей, поскольку кристаллиты ориентированы произвольно, обладают анизотропией магнитных свойств, имеют магнитную текстуру, которая, как правило, наводится внешними воздействиями на материал (прессование в магнитном поле, прокатка и др.). Текстурованные материалы имеют повышенные магнитные характеристики и широко используются в технике.

При намагничивании магнитных материалов наблюдается изменение их размеров и формы, такое явление называется *магнитострикцией*. Магнитострикция может быть объемной (изменение объема тела) и линейной (изменение размеров тела). По природе линейная магнитострикция анизотропна. Например, для монокристаллического железа, намагниченного в направлении ребра куба, линейные размеры в этом направлении уменьшаются, при намагничивании вдоль диагонали куба - увеличиваются, т.е. магнитострикция может быть положительной и отрицательной.

Процесс перемагничивания магнитных материалов в переменном магнитном поле связан с тепловыми потерями части энергии магнитного поля, что внешне проявляется в нагревании материала. Потери в магнитном материале характеризуются удельными магнитными потерями $P_{уд}$ или тангенсом угла магнитных потерь $\text{tg} \delta_m$.

По механизму возникновения различают потери на гистерезис и динамические. Потери на гистерезис связаны с явлением магнитного гистерезиса и с необратимым перемещением границ доменов. Они пропорциональны площади петли гистерезиса и частоте переменного поля. Мощность потерь, расходуемая на гистерезис,

$$P_r = \eta B_{\max}^n f v, \quad (7.7)$$

где η - коэффициент, зависящий от свойств материала; B_{\max} - максимальная индукция в течение цикла, Тл; $n = 1,6 \dots 2,0$ - показатель степени, значение которого зависит от B ; f - частота, Гц; v - объем образца, см³.

Динамические потери, которые учитывают в слабых магнитных полях, обусловлены вихревыми токами и потерями на магнитное последствие или магнитной вязкостью, а также отставанием магнитной индукции от изменения напряженности магнитного поля. Потери на вихревые токи вызываются электрическими токами, которые индуцируются в магнитном материале внешним магнитным полем, и сильно зависят от электрического сопротивления материала. Увеличение сопротивления приводит к уменьшению потерь. Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты магнитного поля, поэтому применение магнитных материалов с низким электрическим сопротивлением ограничено на высоких частотах. Мощность потерь на вихревые токи

$$P_f = \xi B_{\max}^2 f^2 v, \quad (7.8)$$

где ξ - коэффициент, зависящий от типа магнитного материала и его формы.

Для работы в переменных магнитных полях используют материалы с узкой петлей гистерезиса, т.е. с очень малой коэрцитивной силой. Например, коэрцитивная сила высоконикелевых легированных пермаллоев 1,0...5,0 А/м. Для уменьшения потерь применяются специальные меры. Например, для уменьшения потерь на вихревые токи необходимо повысить удельное электрическое сопротивление магнитных материалов. В электротехнических сталях повышение электрического сопротивления достигается легированием кремнием. Применение в магнитопроводах тонких листов ферромагнитных материалов, изолированных друг от друга лаком или окалиной, уменьшает потери на вихревые токи. В магнитодиэлектриках частицы порошкового магнитного материала покрыты электроизоляционной связкой.

Магнитомягкие материалы используют в производстве сердечников трансформаторов, электромагнитов, электрических машин, в измерительных приборах и других аппаратах.

Магнитотвердые материалы применяют для производства постоянных магнитов, в машинах малой мощности, различных аппаратах и приборах.

4.3. Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы (МММ) должны иметь высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу, большую индукцию насыщения, узкую петлю гистерезиса, малые магнитные потери.

Магнитомягкие материалы можно разделить на следующие группы: технически чистое железо (низкоуглеродистая сталь); кремнистая электротехническая сталь; сплавы с высокой начальной магнитной проницаемостью; сплавы с большой индукцией насыщения, ферриты.

Технически чистое железо (низкоуглеродистая сталь). Железо представляет собой магнитомягкий материал, свойства которого сильно зависят от содержания примесей.

Технически чистое железо содержит не более 0,1 % углерода, серы, марганца и других примесей и обладает сравнительно малым удельным электрическим сопротивлением, что ограничивает его применение. Используется оно в основном для магнитопроводов постоянных магнитных потоков и готовится рафинированием чугуна в мартеновских печах.

Магнитные свойства железа сильно зависят от его чистоты и способа обработки. В зависимости от способа получения чистого железа различают железо электролитическое и карбонильное.

Электролитическое железо получают в процессе электролиза сернокислого или хлористого железа, оно применяется в постоянных полях.

Карбонильное железо получают термическим разложением пентакарбонила железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$. Карбонильное железо получают в виде порошка, и его удобно использовать для изготовления сердечников, работающих на повышенных частотах. Кремнистая электротехническая сталь содержит менее 0,05% углерода, от 0,7 до 4,8% кремния и относится к магнитомягким материалам широкого применения. Легирование стали кремнием приводит к существенному повышению удельного электрического сопротивления, которое растет линейно от 0,1 мкОм*м при нулевом содержании кремния до 0,60 мкОм*м при содержании кремния 5,0%, к увеличению $\mu_{\text{гн}}$ и μ_{max} , уменьшению H_c , снижению потерь на гистерезис. Сталь с содержанием кремния 6,8% обладает наивысшей магнитной проницаемостью, но в промышленности сталь применяют с содержанием кремния не выше 5,1 %. Так как кремний ухудшает механические свойства стали, она становится непригодной для штамповки.

Свойства стали можно значительно улучшить в результате холодной прокатки, которая вызывает преимущественную ориентацию кристаллитов, а также в результате отжига в среде водорода при температуре 900... 1000°C, снимающего механические напряжения и способствующего укрупнению кристаллических зерен. Оси легкого намагничивания кристаллитов ориентируются вдоль направления проката (о такой стали говорят, что она обладает *ребровой текстурой*). Магнитные свойства вдоль направления прокатки существенно выше.

Сталь маркируется четырьмя цифрами: первая означает структурное состояние и вид прокатки (1 - горячекатаная изотропная, 2 - холоднокатаная изотропная, 3 - холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой); вторая - примерное содержание кремния; третья - основные нормируемые характеристики [0 - удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{17/50}$), 1 - при индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,5/50}$), 2 - при индукции 1 Тл и частоте 400 Гц ($P_{1/400}$), 6 - магнитная индукция в слабых

магнитных полях при напряженности поля $0,4 \text{ А/м}$ ($B_{0,4}$), 7 - магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м

Вместе первые три цифры означают тип стали, четвертая - порядковый номер типа стали.

Удельное электрическое сопротивление стали зависит от концентрации кремния. Электротехническая сталь выпускается в виде отдельных листов, рулонов или ленты и предназначается для изготовления магнитопроводов. Для уменьшения потерь на вихревые токи на листы стали может быть нанесен электроизоляционный лак.

Качество электротехнической стали можно повысить, уменьшая количество примесей в ее составе, применением разработки оптимальной технологии производства стали с ребровой структурой и получением стали с повышенным содержанием кремния (до $6,3\%$).

Пермаллои. Они относятся к магнитомягким материалам, обладающим высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, и представляют собой железоникелевые сплавы. Такие сплавы характеризуются тем, что значения магнитной анизотропии и магнитострикции равны нулю; это является одной из причин особенно легкого намагничивания пермаллоев. Пермаллои подразделяются на высоконикелевые ($72\text{...}80\%$ никеля) и низконикелевые ($40\text{...}50\%$ никеля).

Сплавы, легированные молибденом, хромом, медью, марганцем, кремнием, а также другими элементами используются шире. Классический пермаллой с концентрацией никеля $78,5\%$ имеет наибольшие значения μ_{max} и $\mu_{\text{гн}}$. Высокие магнитные свойства классического пермаллоя получаются в результате высокотемпературного отжига при температуре 1300°C в чистом сухом водороде и при длительном температурном отпуске при температуре $400\text{...}500^\circ\text{C}$.

Магнитные свойства пермаллоев сильно зависят от химического состава и наличия примесей в сплаве. На свойства пермаллоев отрицательно влияют примеси, которые не образуют твердых растворов со сплавом: углерод, сера и кислород. Свойства резко изменяются от режимов термообработки.

Магнитная проницаемость высоконикелевых пермаллоев выше, чем низконикелевых, и значительно превышает проницаемость электротехнических сталей, но индукция насыщения пермаллоев в 1,5...2 раза меньше; следовательно, их нецелесообразно применять в силовых трансформаторах и других устройствах, в которых используется большой магнитный поток.

Удельное электрическое сопротивление низконикелевых пермаллоев в 2 раза выше высоконикелевых, поэтому можно использовать при более высоких частотах.

Стоимость высоконикелевых пермаллоев больше, чем низконикелевых, но они менее технологичны.

Для улучшения свойств пермаллоев их легируют различными добавками. Легирование молибденом и хромом увеличивает удельное электрическое сопротивление и начальную проницаемость, позволяет упростить технологию получения, уменьшает чувствительность к механическим напряжениям и снижает индукцию насыщения. Медь благоприятно влияет на температурную стабильность и стабильность магнитной проницаемости при изменении напряженности внешнего поля. Кремний и марганец увеличивают удельное сопротивление.

Из железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью можно выделить следующие группы:

нелегированные низконикелевые пермаллои - марок 45Н и 50Н (содержание никеля 45 и 50%);

сплавы, обладающие текстурой и прямоугольной петлей гистерезиса - 50НП, 65НП, 34НКП; низконикелевые пермаллои (50% Ni), легированные хромом и кремнием - 50НХС;

высоконикелевые пермаллои, легированные соответственно молибденом, хромом и кремнием, хромом и медью - 79НМ, 80НХС, 76НХД.

Таблица 7.3

Параметр	3411	3414	3416
Удельные потери, Вт/кг, не более:			
$P_{1,0/50}$	1,1/0,8	0,7/0,5	–
$P_{1,5/50}$	2,45/1,75	1,5/1,1	0,89
$P_{1,7/50}$	3,2/2,5	2,2/1,6	1,3
Магнитная индукция при напряженности магнитного поля, А/м не менее:			
100	–	1,6/1,6	1,61
250	–	1,7/1,7	1,7
2500	1,75/1,75	1,88/1,88	1,9
Электрическое сопротивление, мкОм · м	0,5/0,5	0,5/0,5	0,5

Все сплавы содержат в небольших количествах марганец и кремний. В марках пермаллоев буква Н означает никель, М - марганец, Х - хром, Д - медь, К - кобальт, С - кремний, П - прямоугольную петлю гистерезиса. Сплавы с улучшенными свойствами обозначают дополнительно буквой У.

Сплавы изготавливаются в виде холоднокатаных лент толщиной 0,02...2,5 мм, шириной 30...250 мм, горячекатаных листов, горячекатаных и кованных прутков.

Сплавы 45Н и 50Н обладают наиболее высокой индукцией насыщения, поэтому их применяют для сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей и деталей магнитных цепей, которые работают при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием. Сплав 50НХС обладает повышенным сопротивлением и

используется для сердечников импульсных трансформаторов, а также в устройствах связи для звуковых и высоких частот.

Высоконикелевые сплавы 79 НМ, 80 НХС, 76 НХД применяются для сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов, при толщине 0,02 мм - для сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей.

Недостатками пермаллоев являются их относительно высокая стоимость, сильная зависимость магнитных свойств от механических напряжений.

Альсифер - тройной сплав, состоящий из алюминия, кремния и железа. Сплав оптимального состава (9,6% Si 5,4% Al, остальное - Fe) по своим свойствам не отличается от пермаллоев и имеет следующие характеристики: $\mu_{гн} \approx 35500$, $\mu_{гmax} = 120000$, $H_c = 18$ А/м, $\rho = 0,8$ мкОм·м. Такие характеристики получаются только при строгом соблюдении состава, промышленные образцы имеют более низкие характеристики. Альсифер получают в виде литого, нековкого материала с высокой твердостью и хрупкостью, поэтому изделия из альсифера изготавливаются методом литья с толщиной стенок не менее 2... 3 мм. Область применения альсифера - магнитные экраны, корпуса приборов машин, детали магнитопроводов для работы в постоянных или медленно меняющихся магнитных полях. Альсифер хрупок, поэтому его можно размалывать в порошок и применять для изготовления прессованных сердечников и магнитодиэлектриков.

Магнитные сплавы с особыми свойствами. В ряде случаев требуются материалы с повышенным постоянством магнитной проницаемости в слабых магнитных полях. Материалы с такими свойствами необходимы для создания магнитных элементов с большим магнитным потоком, в частности в некоторых дросселях, трансформаторах тока, аппаратуре телефонной связи, измерительных приборов и др. Магнитная проницаемость может быть обусловлена обратимыми и необратимыми процессами намагничивания. Проницаемость постоянна при обратимых процессах намагничивания,

следовательно, такие материалы должны обладать обратной проницаемостью в различных магнитных полях.

Экспериментально установлено, что постоянством проницаемости обладают материалы на основе Fe-Ni, Fe-Gb, Fe-Ni-Co сплавов. Тройной сплав (25% Co, 45% Ni, остальное - Fe) называют *перминваром*. Магнитная проницаемость перминвара после специальной термической обработки в вакууме становится равной 300 и остается постоянной при напряженности поля от 0 до 160 А/м. Индукция насыщения перминваров достигает 1,55 Тл. Применение перминвара ограничивается сложностью технологии получения и высокой стоимостью.

Более высокая стабильность магнитной проницаемости, но при меньшем ее значении ($\mu_{гн} = 30 \dots 80$) имеется в сплаве изотерм, который состоит из железа, никеля, алюминия и меди. После холодной прокатки в этих материалах постоянство магнитной проницаемости сохраняется при напряженности поля до 500 А/м. Применяется сплав в производстве телефонной аппаратуры.

Для различных типов сердечников, полюсов электромагнитов, работающих в магнитных полях с напряженностью 24000 А/м и выше, необходимы материалы с особо высокой индукцией насыщения. Такими свойствами обладает Fe-Co - сплав *пермендюр*, который состоит из 30...50% кобальта, 1,5...2% ванадия (остальное - железо). Этот сплав обладает наивысшей из всех известных ферромагнетиков индукцией насыщения (до 2,43 Тл).

Из-за его высокой стоимости применяется пермендюр в специализированной аппаратуре, в частности для изготовления мембран телефонов, осциллографах и т.д. К числу недостатков пермендюра относится малое удельное электрическое сопротивление, которое приводит к значительным потерям на вихревой ток при работе в переменных магнитных полях.

В электротехнике используют материалы с большой зависимостью магнитной проницаемости от температуры для температурной компенсации (термокомпенсации) магнитных цепей. Из них изготавливаются магнитные шунты, с помощью которых достигается температурная стабильность свойств магнитных цепей с постоянным магнитом. С увеличением температуры магнитный поток в рабочем зазоре основного магнита снижается. Это изменение компенсируется возрастанием магнитного сопротивления шунта. Термомагнитный материал шунта должен иметь магнитную проницаемость, которая сильно зависит от температуры в рабочем диапазоне от -70 до $+80^{\circ}\text{C}$, и точку Кюри, близкую к рабочей температуре установки.

В качестве термомагнитных материалов для магнитных шунтов применяют следующие сплавы: медно-никелевый - кальмаллой, железо-никелевый - термаллой, железо-никель-хромовый - компенсатор.

Изменение концентрации меди в *кальмалло*е от 3 до 40% позволяет изготавливать сплавы, которые компенсируют изменение магнитной проницаемости в магнитных цепях в пределах температур $20\dots 80^{\circ}\text{C}$ и от -50 до $+10^{\circ}\text{C}$. Недостатком *кальмалло*я является низкая индукция насыщения, для повышения ее в *кальмалло*й добавляют присадки железа. *Термалло*й содержит от 28,5 до 33,5% никеля. По сравнению с *кальмалло*ями он обладает более высокой индукцией насыщения, которая резко зависит от температуры. Недостатками *термалло*я являются наличие значительного температурного гистерезиса в области низких температур, сравнительно низкий предел отрицательных температур, а также сильное влияние состава на свойства материала.

Для более широкого применения в области низких температур железо-никелевые сплавы легируют хромом. Такие сплавы называют *компенсаторами*. Их свойства в меньшей степени зависят от состава; они

хорошо обрабатываются и имеют достаточно высокую индукцию насыщения.

Методами порошковой металлургии разработаны термомагнитные сплавы на основе Fe-Ni-Mo. Магнитные свойства их близки к сплавам компенсаторам, но эти материалы отличаются более высокой воспроизводимостью свойств.

Аморфные магнитные материалы. В последнее время уделяется большое внимание вопросам получения и применения аморфных магнитных материалов (АММ). Особенностью АММ является отсутствие в них дальнего порядка в расположении атомов. Однако, несмотря на отсутствие периодичности в расположении атомов, АММ обладают упорядоченным расположением магнитных моментов. АММ во многом подобны стеклам и металлическим расплавам. Такие материалы получают быстрым охлаждением из расплавленного состояния, кристаллизация при этом не успевает осуществиться.

Быстрое охлаждение расплавленного сплава достигается различными технологическими приемами, среди которых есть непрерывные или полунепрерывные методы. Аморфная структура получается при скорости охлаждения расплава до $10^5 \dots 10^8$ К/с.

Современными методами можно изготовить из аморфного материала проволоку или ленту различного профиля непосредственно из расплава со скоростью до 1800 м/мин. АММ обладает очень высокими магнитными характеристиками наряду с повышенным сопротивлением. После получения АММ еще не обладают высокими магнитными параметрами, для повышения их в большинстве случаев проводится термическая обработка во внешнем магнитном поле. Обработка АММ обеспечивает более высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу, повышенные значения индукции насыщения и удельного электрического сопротивления, что уменьшает потери на гистерезис и вихревые токи. Производство АММ дешевле, чем

производство металлических листовых магнитомягких материалов. Металлические магнитомягкие АММ состоят из 75...85% смеси (или одного) из металлов - железа, кобальта, никеля и 15... 25% неметаллов (легкоплавкого компонента - стеклообразующего). Перспективными высокопроницаемыми материалами являются аморфные сплавы железа и никеля (40% Ni, 40% Fe, 14% P, 6% B), высокожелезистые (80% Fe, 16% P, остальное С и В) и высококобальтовые (70% Co, 15% Si, остальное В и Fe). Для улучшения отдельных свойств АММ дополнительно легируют хромом, молибденом, алюминием, марганцем, ванадием и др. Неметаллы ухудшают магнитные и температурные параметры АММ, но увеличивают удельное электрическое сопротивление ρ , которое изменяется от 1,25 до 1,8 мкОм-м. Неметаллы повышают прочность, твердость, износостойкость и коррозионностойкость.

По магнитным свойствам АММ близки к электротехническим сталям и пермаллоям. В зависимости от состава и термообработки, у этих материалов μ_r max изменяется в пределах 12000...750000, B_s - от 0,7 до 1,6 Тл, H_c - от 0,56 до 8,0 А/м.

Аморфные магнитные материалы используются в технике магнитной записи и воспроизведения, различных типах специальных трансформаторов, импульсных источниках питания и преобразователях постоянного напряжения на частотах до нескольких мегагерц, магнитных усилителях, магниторезистивных головках с высокой плотностью записи, электродвигателях с высоким КПД, в качестве конструкционных материалов.

Магнитодиэлектрики. Эти материалы состоят из конгломерата мелкодисперсных частиц ферро- или ферримагнитного материала, изолированных между собой органическим или неорганическим диэлектриком - связующим элементом. Благодаря тому, что частицы магнитной фазы изолированы, магнитодиэлектрики обладают высоким удельным сопротивлением и малыми потерями на вихревой ток, но имеют

пониженное значение магнитной проницаемости. Магнитодиэлектрики характеризуются незначительными потерями на гистерезис и высокой стабильностью проницаемости.

Электрическая изоляция ферромагнитных частиц обеспечивается жидким стеклом, различными смолами, например полистиролом, фенолформальдегидной смолой или другими связующими веществами. Размеры ферромагнитных частиц $d = 10^{-2} \dots 10^{-4}$ см.

Наиболее широкое распространение получили магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа, альсифера и молибденового пермаллоя.

Технология изготовления изделий из магнитодиэлектриков состоит из приготовления ферромагнитного порошка, прессования изделия и обработки. Магнитодиэлектрики предназначаются для работы в слабых магнитных полях, близких по значению к коэрцитивной силе, и используются в высокочастотной проводной связи, радиоэлектронике и других областях.

Магнитная проницаемость магнитодиэлектрика слабо зависит от частоты. Для магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа начальная магнитная проницаемость 10...20, на основе альсифера -20...94, на основе пермаллоев - 60...250. Изделия из магнитодиэлектриков изготавливаются в виде кольцевых и броневых сердечников или в виде элементов других конфигураций.

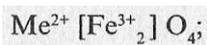
Ферриты. Основным достоинством ферритов является сочетание высоких магнитных параметров с большим электрическим сопротивлением, которое превышает сопротивление ферромагнитных металлов и сплавов в $10^3 \dots 10^{13}$ раз, и, следовательно, они имеют относительно малые потери в области повышенных частот, что позволяет использовать их в высокочастотных электромагнитных устройствах.

Химический состав магнитомягких ферритов с высокой магнитной проницаемостью может быть записан химической формулой MeOFe_2O_3 , или MeFe_2O_4 , где в качестве металла используются двухвалентные ионы Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Mg^{2+} и др. Ионы двухвалентного металла характеризуют феррит, который получает название по характеризующему металлическому иону, например NiFe_2O_4 - никелевый феррит, ZnFe_2O_4 - цинковый феррит. Кристаллическая структура приведенных ферритов аналогична структуре природного минерала - благородной шпинели MgAl_2O_4 поэтому их называют ферритами со структурой *шпинели* или *феррошпинели*. Такая структура представляет собой гранцентрированную плотноупакованную кубическую решетку, в которой наплотнейшую упаковку образуют большие ионы кислорода (ионный радиус 0,132 нм). Металлические ионы, имеющие меньший ионный радиус (0,04...0,1 нм), располагаются в промежутках (узлах), которые образуются между ионами кислорода. В структуре типа шпинели существует два типа промежутков: тетраэдрические, образованные четырьмя ионами кислорода, и октаэдрические, образованные шестью ионами кислорода.

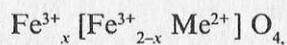
В центрах этих промежутков находятся ионы металла. В элементарной кубической ячейке, которая состоит из восьми молекул MeFe_2O_4 , содержится 64 тетраэдрических и 32 октаэдрических промежутка. В структуре шпинели ионами металла занято 8 тетраэдрических (А-узлы) и 16 октаэдрических (В-узлы) промежутков.

Распределение ионов двух- и трехвалентного металла по узлам кристаллической решетки оказывает существенное влияние на магнитные свойства ферритов. В зависимости от распределения ионов металла существует три типа шпинелей:

нормальная, у которой в А-узлах размещены ионы двухвалентного металла, и в В-узлах (обозначенных квадратными скобками) - ионы трехвалентного железа. Химическая формула нормальной шпинели



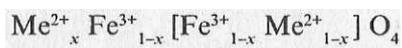
обращенная, у которой в Л-узлах находится часть ионов трехвалентного железа, а в Б-узлах - оставшаяся часть ионов Fe^{3+} и ионы двухвалентного металла, что соответствует химической формуле



где χ - доля ионов железа в Л-узлах;

смешанная - ионы двух- и трехвалентного металла появляются

одновременно в А- и В-узлах:



Распределение ионов по А- и В-узлам определяется ионным радиусом, конфигурацией электронных оболочек ионов и электростатической энергией (зарядом ионов).

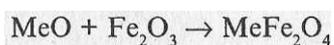
Выше отмечалось, что в ферритах осуществляется косвенное обменное взаимодействие, которое приводит к антипараллельной ориентации магнитных моментов соседних ионов. В феррошпинелях соседними ионами оказываются ионы, находящиеся в А- и В- узлах (Л-О-В-взаимодействие). В этом случае решетку можно представить как состоящую в магнитном отношении из двух подрешеток А и В, причем внутри подрешеток магнитные моменты ионов параллельны друг другу. Таким образом, суммарная намагниченность феррита может быть представлена как разность намагниченностей подрешеток октаэдрической $M_s(B)$ и тетраэдрической $M_s(A)$, т.е. $M_s = -|M_s(B) - M_s(A)|$

Если намагниченности подрешеток неодинаковы, как в случае ферритов, возникает спонтанная намагниченность. Цинковый и кадмиевый ферриты, которые обладают структурой нормальной шпинели, немагнитны. В этом случае диамагнитные ионы Zn^{2+} и Cd^{2+} занимают Л-узлы, тем самым взаимодействие А-О-В ликвидируется, взаимодействие в подрешетке В (В-В-взаимодействие) мало и не создает упорядочение магнитных моментов.

При повышении температуры магнитное упорядочение в обращенных и смешанных феррошпинелях, в которых существует спонтанная намагниченность, нарушается, и намагниченность уменьшается до нуля при температуре Кюри. Зависимость спонтанной намагниченности феррошпинелей с увеличением температуры в большинстве случаев монотонно убывающая и аналогична зависимости для металлических магнитных материалов.

Технология получения ферритов. Ферриты получают методом керамической технологии. В промышленности в основном используются метод смешивания оксидов или карбонатов нерастворимых в воде и метод термического разложения солей различных металлов. Наиболее простым является метод смешивания оксидов или карбонатов. Технология получения ферритов по этому методу состоит в следующем: исходные оксиды взвешивают, подвергают первому помолу и тщательному перемешиванию в шаровых или вибрационных мельницах. Затем, после сушки и прессования брикетов (или гранулирования), осуществляют предварительный обжиг при температуре на несколько сот градусов ниже температуры окончательного обжига. После этого следует второй помол, и порошок в дальнейшем используют для получения изделий.

Изделия из ферритов формуются прессованием в стальных пресс-формах, выдавливанием через мундштук, горячим литьем под давлением, горячим прессованием. Для улучшения пластичности при изготовлении изделий в ферритовый порошок вводят пластификаторы (вода, поливиниловый спирт, парафин и др.). Изделие подвергают окончательному обжигу при температуре 1100... 1400°C. Во время обжига происходит спекание частиц и заканчивается реакция ферритизации, начавшаяся при предварительном обжиге, (химическая реакция, протекающая между твердыми частицами при нагревании в процессе диффузии катионов) по уравнению



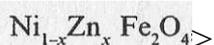
Ферритовые спеченные изделия отличаются высокой твердостью и хрупкостью. Ферриты можно обрабатывать абразивным инструментом из синтетических алмазов или подвергать их резке, шлифовке и полировке.

В ферритовых изделиях можно пробивать отверстия ультразвуком. Ультразвук позволяет производить пайку ферритов между собой и металлом. Ферритовые детали склеивают полистироловым, эпоксидным или другими клеями. Ферриты по своим свойствам делятся на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие ферриты используют для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, магнитных антенн, статоров и роторов высокочастотных электрических моторов небольшой мощности, деталей отклоняющих систем телевизионной аппаратуры. Ферриты обладают более низкой индукцией насыщения, чем металлические ферромагнетики, поэтому в сильных полях их применять нецелесообразно, однако в высокочастотных полях ферриты могут иметь более высокую индукцию, так как отсутствует размагничивающее действие вихревых токов.

Наиболее распространенными промышленными магнитомягкими ферритами являются твердые растворы простых ферритов:

никель-цинковые, представляющие собой твердые растворы никелевого феррита NiFe_2O_4 , и феррита цинка. Химическая формула такого феррита: ZnFe_2O_4



где x - доля концентрации цинка в феррите. Увеличение концентрации цинка до некоторого предела ($x = 0,4...0,6$) приводит к увеличению намагниченности насыщения, индукции, магнитной проницаемости и уменьшению температуры Кюри;

марганец-цинковые, представляющие собой твердые растворы марганцевого феррита MnFe_2O_4 и цинкового феррита ZnFe_2O_4 . Такие ферриты имеют меньший тангенс угла потерь в области частот 1 МГц, чем никель-цинковые ферриты, что объясняется меньшими потерями на гистерезис. Марганец-цинковые ферриты имеют более высокие значения температуры Кюри и индукции насыщения. Недостатком марганец-цинковых ферритов является меньшее значение рабочей частоты (до нескольких мегагерц), никель-цинковые ферриты можно использовать на частотах до 100 МГц;

литиевые типа $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$, в которых в качестве двухвалентного металла используется комплекс ионов $1/2 (\text{Li}^{1+} + \text{Fe}^{3+})$. Литиевые ферриты обладают структурой обращенной шпинели, имеют наиболее высокую индукцию насыщения и используются на частотах до 200 МГц.

Магнитомягкие ферриты маркируются следующим образом: на первом месте ставится примерное значение магнитной проницаемости, затем стоят буквы, определяющие частотный диапазон. Ферриты для частот 0,1 ...50 МГц обозначают буквой Н (низкочастотные), для диапазона 50...600 МГц высокочастотные ферриты обозначаются ВЧ. Далее в маркировке следуют буквы, означающие состав материала: М - марганец-цинковые, Н - никель-цинковые и т.д. Никель-цинковые ферриты маркируются также маркой ВЧ.

Магнитные свойства ряда магнитомягких ферритов приведены в табл. 4.4. Для оценки допустимого частотного диапазона, где может использоваться ферритовый материал, вводят понятие критической частоты $f_{\text{кр}}$, при которой тангенс угла магнитных потерь достигает значения 0,1.

Таким образом, можно сделать вывод, что чем выше значение начальной магнитной проницаемости ферритов, тем меньше их удельное электрическое сопротивление и тем ниже их критическая частота.

ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) особенно важны в устройствах

автоматического управления аппаратуры телеграфной связи, вычислительной техники, коммутирующих дросселей.

Таблица 7.4

Марка материала	$\mu_{гн}$	$\mu_{гmax}$	$H_c, A/m$	$B_r, Tл$	$T_c, °C$	$f_{кp}, MГц$	$\rho, Ом·м$
20000НМ	15000	35000	0,24	0,11	110	0,01	0,001
10000НМ	8000...1500	17000	4,0	0,11	110	0,3	0,01
60ЭОНМ	4800...8000	10000	8,0	0,11	130	0,01	0,1
2000НМ	1700...2500	3500	24	0,12	200	65	0,5
2000НМ	1800...2000	6000	8	0,1	70	0,02	10
600НМ	500...800	1500	40	0,12	110	1,2	10^2
400НМ	320...500	600	56	0,13	120	2,0	10^3
150ВЧ	130...170	350	250	0,15	400	250	10^4
50ВЧ2	45...65	170	500	0,20	450	70	10^4
20ВЧ2	16...24	45	1000	0,1	450	120	10^6

Важным показателем свойств материалов с ППГ является коэффициент прямоугольности петли гистерезиса, который определяется как отношение остаточной индукции $k_{пу}$ максимальной магнитной индукции:

$$k_{пу} = B_r / B_{max} < 1. \quad (7.9)$$

Материалы с ППГ должны обладать малым временем перемагничивания (время изменения знака индукции с плюса на минус, примерно $10^{-7} \dots 10^{-9}$ с), иметь высокую температурную стабильность магнитных параметров.

Ферриты с ППГ имеют некоторые металлические сплавы железа и никеля (пермаллои) и сплавы «железо-никель-кобальт» с содержанием кобальта от 30 до 55%, легированные медью или другими металлами. Они изготавливаются в виде лент толщиной от единиц до нескольких сотен микрон, их коэффициент прямоугольности от 0,85 до 0,98. Прокатка микронной ленты, ее термообработка и изготовление сердечников сложнее, чем производство изделий из ферритов, поэтому ферриты с ППГ применяются более широко. ППГ в ферритах реализуется при определенном составе и условиях их

спекания. Промышленностью освоен выпуск свыше 25 марок ферритов с ППГ. Широкое распространение получили магниевомарганцевые и литиевые ферриты со структурой шпинели. Для улучшения свойств используются легирование их ионами цинка, кальция, меди, натрия и др.

Основные характеристики ферритов с ППГ следующие: коэффициент прямоугольности $k_{ny} = 0,9 \dots 0,94$, остаточная индукция

$B_r = 0,15 \dots 0,25$ Тл, температура Кюри $T_k = 110 \dots 250^\circ\text{C}$ (для магниевомарганцевых ферритов), $T_k = 550 \dots 630^\circ\text{C}$ (для литиевых), коэрцитивная сила для ферритов, используемых в схемах автоматического управления $10 \dots 20$ А/м, для материалов, используемых в вычислительной технике, $100 \dots 1200$ А/м.

Ферриты с ППГ выпускаются в виде кольцевых сердечников различных типоразмеров или ферритовых пластин (плат) с большим количеством отверстий, выполняющих роль сердечников, например для запоминающих устройств выпускаются платы размером 15×15 мм, которые содержат $16 \times 16 = 256$ отверстий. К недостаткам ферритов с ППГ относится меньшая температурная стабильность параметров, чем металлических сплавов.

3.4. Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы, в отличие от магнитомягких, имеют существенно большие коэрцитивную силу (от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$ А/м) и площадь петли гистерезиса. Такие магнитные материалы применяются для изготовления постоянных магнитов - источников постоянных магнитных полей, которые во многих случаях выгоднее, чем электромагнитные.

Постоянные магниты имеют рабочий воздушный зазор; следовательно, на разомкнутых концах возникают полюсы, создающие размагничивающее поле с напряженностью H_d , снижающее индукцию внутри магнита до B_d , которая меньше остаточной индукции B_r . Остаточная индукция B_r характеризует материал, если магнит находится в замкнутом состоянии и

предварительно намагничен до насыщения в сильном внешнем магнитном поле.

На рис. 4.9 приведены кривые, характеризующие свойства магнитотвердых материалов. Удельная магнитная энергия (Дж/м³) поля, создаваемого в воздушном зазоре магнита,



$$W_d = B_d H_d / 2. \quad (4.10)$$

Индукция разомкнутого магнита B_d уменьшается с увеличением зазора. При замкнутом магните $B_d = B_r$ магнитная энергия равна нулю, так как $H_d = 0$. Если зазор между полюсами велик, то напряженность магнитного поля в зазоре равна коэрцитивной силе материала H_c , а $B_d = 0$. Следовательно, в этом случае магнитная энергия $W_d = 0$. При некоторых значениях B_d и H_d энергия достигает максимального значения:

$$(7.11)$$

Величина W_{max} является важнейшей при оценке качества материала.

Форма кривой размагничивания характеризуется коэффициентом выпуклости

$$\gamma = (BH)_{max} / (B_r H_c). \quad (7.12)$$

Коэффициент выпуклости приближается к единице с увеличением прямоугольности петли гистерезиса. Максимальная энергия магнита тем

больше, чем больше остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c и коэффициент выпуклости γ .

Магнитотвердые материалы по составу и способу получения подразделяют на литые высококоэрцитивные сплавы, металлокерамические материалы, магнитотвердые ферриты, сплавы на основе редкоземельных элементов, прочие магнитотвердые материалы (мартенситные сплавы, пластически деформируемые сплавы и др.).

Литые **высококоэрцитивные сплавы**. Наибольшее распространение получили магнитотвердые материалы на основе железо-никель-алюминиевых и железо-никель-кобальт-алюминиевых сплавов, легированных различными добавками.

Высококоэрцитивное состояние таких сплавов обуславливается механизмом дисперсионного твердения (иногда такие сплавы называются сплавами *дисперсионного твердения*). При высоких температурах (1200... 1300°C) растворимость элементов не ограничена, и сплавы Fe-Ni-Al находятся в однородном состоянии (α -фаза). При медленном охлаждении до определенной температуры происходит дисперсионный распад равновесной фазы на две (α_1 и α_2) фазы, причем α_1 -фаза, по своему составу близкая к чистому железу, является сильномагнитной, фаза α_2 состоит из Ni-Al и является слабомагнитной. Таким образом, сильномагнитная фаза α_1 в виде однодомеинных включений распределена в немагнитной фазе α_2 . Материалы, имеющие такую структуру, обладают большим значением коэрцитивной силы.

Высококоэрцитивное состояние сплавов Fe-Ni-Al получается при концентрации 20... 33% никеля и 11... 17% алюминия. Для улучшения магнитных свойств сплавы легируют. Легирование медью повышает коэрцитивную силу и улучшает механические свойства, но приводит к снижению остаточной индукции. Легирование кобальтом позволяет существенно улучшить коэрцитивную силу и повышает индукцию

насыщения и коэффициент выпуклости. В качестве легирующих элементов используются также титан, кремний и ниобий. Коэрцитивная сила $H_c = 50$ кА/м, а магнитная энергия $W_{\max} = 12$ кДж/м³.

Магнитотвердые материалы типа Al-Ni-Co представляют собой сплав железа с никелем (12...26 %), кобальтом (2...40%) и алюминием (6...13 %), содержащий для улучшения магнитных свойств легирующие добавки меди (2...8 %), титана (0...9%) и никеля (0... 3%). Сплавы, содержащие более 15 % кобальта, подвергаются термомагнитной обработке, которая заключается в охлаждении сплава от высоких температур 1250... 1300°C в сильном магнитном поле, при этом возникает магнитная текстура и сплав становится магнитоанизотропным. Изотропные сплавы имеют магнитную энергию $W_{\max} = 6$ кДж/м³, анизотропные - $W_{\max} = 16$ кДж/м³.

Для улучшения магнитных свойств сплавы подвергаются кристаллической текстуре, которая создается при направленной кристаллизации сплава (особые условия охлаждения сплава). В результате возникает микроструктура в виде ориентированных столбчатых кристаллов. При этом наблюдается увеличение всех магнитных параметров. Магнитная энергия W_{\max} повышается на 60...70% по сравнению с обычной кристаллизацией и достигает 40 кДж/м³.

Магнитные свойства ряда сплавов приведены в табл. 7.5. Марки сплавов обозначаются буквами: Б - ниобий, Д - медь, К – кобальт, Н - никель, Т - титан, Ю - алюминий, А - столбчатая структура. Цифры указывают процентное содержание элемента.

Таблица 7.5

Марка сплава	W_{\max} , кДж/м ³	H_c , кА/м	B_r , Тл
ЮНД4	3,6	40	0,50
ЮНД8	5,1	44	0,60
ЮНКД15	6,0	48	0,75
ЮНКД18	9,7	55	0,90
ЮНКД24	18	52	1,15
ЮН13ДК25БА	28	48	1,40
ЮНДК31ТЗБА	32	92	1,15
ЮНДК34Т5	14	92	0,75
ЮНДК35Т5	18	110	0,75
ЮНДК35Т5БА	36	110	1,02

Изделия из сплавов получают в основном методом литья. Недостатками сплавов являются особая хрупкость и высокая твердость, поэтому обработка их на металлорежущих станках затруднена. Механической обработке в виде грубой обдирки резанием с применением твердосплавных резцов поддаются сплавы, не содержащие кобальта.

Бескобальтовые сплавы являются дешевыми и не содержат дефицитных металлов, но свойства их не очень высоки. Текстурированные сплавы, содержащие кобальт, имеют высокие магнитные характеристики, но в несколько раз дороже, чем бескобальтовые.

Металлокерамические и металлопластические магниты. Они создаются методами порошковой металлургии, которые позволяют автоматизировать процесс производства, получать изделия со строго выдержанными размерами.

Металлокерамические магниты изготовляют из измельченных тонкодисперсных порошков сплавов ЮНДК, а также сплавов Си- Ni-Co, Си- Ni-Fe применением прессования и дальнейшего спекания при высоких

температурах. Такой способ выгодно применять для производства мелких деталей или магнитов сложной конфигурации.

Так как металлокерамические магниты содержат воздушные поры, то их магнитные свойства уступают литым материалам. Как правило, пористость (3...5%) уменьшает остаточную индукцию B_2 и магнитную энергию W_{\max} на 10...20% и не влияет на коэрцитивную силу H_c . Механические свойства их выше, чем литых магнитов. Металлопластические магниты изготавливать проще, чем металлокерамические, но свойства их хуже. Металлопластические магниты получают из порошка сплавов ЮНД или ЮНДК, смешанного с порошком диэлектрика (например, фенолоформальдегидной смолой). Процесс изготовления магнитов подобен процессу прессования пластмасс и заключается в прессовании смеси под давлением 500 МПа, нагревании заготовок до температуры 120...180°C для полимеризации диэлектрика.

Механические свойства металлопластических магнитов лучше, чем литых, но магнитные свойства хуже, так как они содержат до 30% объема неферромагнитного связующего диэлектрического материала; B_r меньше на 35... 50%, W_{\max} - на 40... 60%.

Магнитотвердые ферриты. Наибольшее распространение получили магнитотвердые материалы на основе бариевого (стронциевого) феррита $BaFe_{12}O_{19}$ ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$)₁ и кобальтового феррита $CoFe_2O_4$ ($CoO \cdot Fe_2O_3$). Кобальтовый феррит имеет структуру типа шпинели, а бариевый - структуру природного минерала магнетоплюмбита с гексагональной решеткой. Бариевые и стронциевые магниты обладают большой магнитной анизотропией, которая наряду с мелкозернистой структурой приводит к повышенным значениям коэрцитивной силы (до 350 кА/м). Промышленность выпускает бариевые, стронциевые и смешанные бариево-стронциевые ферриты, содержащие изотропные (маркировка БИ) и анизотропные (БА, СА - стронциевый и РА - смешанный) редкоземельные

добавки. Технология производства магнитов БИ не отличается от технологии магнитомягких ферритов.

Особенность производства анизотропных магнитов состоит в том, что после предварительного обжига в результате мокрого помола готовится полужидкая масса порошка феррита, которая прессуется в сильном магнитном поле при откачке влаги. В результате в материале создается магнитная текстура, и он становится анизотропным. Основные параметры магнитов из бариевых и кобальтовых ферритов приведены в табл. 7.6. В названии марок первые цифры обозначают значение $(BH)_{max}$, три цифры в конце значение коэрцитивной силы по намагниченности, буквы в середине - тип феррита.

Все магниты, на основе гексагональных ферритов обладают высокой стабильностью при воздействии магнитных полей, вибрации и ударном воздействии, их можно использовать в магнитных цепях, работающих в высокочастотных полях, так как сопротивление бариевых магнитов велико (до $10^6 \dots 10^9$ Ом-м).

Таблица 7.6

Марка сплава	B_r , Тл	H_c , кА/м	W_{max} , кДж/м ³
4БИ145	0,17	145	2,0
7БИ300	0,20	135	3,5
19БА260	0,33	260	9,5
28БА170	0,39	170	14,0
30РА190	0,40	190	15,0
21СА320	0,34	320	10,5
24СА190	0,37	190	12,0
28 СА250	0,39	250	14,0

Бариевые магниты не, содержат дефицитных материалов и примерно в 10 раз дешевле магнитов из ЮНДК.

К недостаткам бариевых магнитов относятся низкая остаточная индукция, высокая хрупкость и твердость, а также значительная зависимость магнитных свойств от температуры. Кобальтовые ферриты более температуростабильны.

Сплавы на основе редкоземельных металлов. Интерметаллические соединения кобальта с редкоземельными металлами (РЗМ) церием Ce, самарием Sm, празеодимом Pr, лантаном La и иттрием Y - типа R_xCo_y , где соединение R-РЗМ обладает очень высокими значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии. Из этой группы наиболее важны соединения типа RCO_5 и R_2Co_{17} , которые обладают наибольшей магнитной анизотропией, значительной спонтанной намагниченностью и высокой температурой Кюри. Соединения RCO_5 нестабильны и распадаются на две или большее количество фаз. Многофазность, высокое значение магнитной анизотропии и магнитострикции являются причинами появления высокой коэрцитивной силы.

Технология получения магнитов из РЗМ заключается в спекании порошков в присутствии жидкой фазы или литья. Жидкая фаза создается благодаря тому, что РЗМ берется в избытке. Магнитные свойства сплавов приведены в табл. 4.7.

Дальнейшее увеличение максимальной магнитной энергии может быть

Таблица 7.7

Соединение	H_c , кА/м	B_r , Тл	W_{max} , кДж/м ³	T_k , °C
SmCo ₅	560	0,92	75	725
PrCo ₅	415	0,94	56	610
Sm _{0,5} Pr _{0,5} Co	450...700	0,89...1,0	80...92	
Y ₂ Co ₁₇	500...800	1,15	156	940
Sm ₂ Co ₁₇	550...700	1,1	144	920

получено только при увеличении B_r материалов. В табл. 4.7 приведены теоретические значения параметров перспективных сплавов Y₂Co₁₇ и Sm₂Co₁₇. Лабораторные образцы на основе сплава R₂Co₁₇ состава - 52% (Jo), 25,5% Sm,

8% Си, 14% Fe и 1,1 % Zn имеют параметры $B_r = 1,1$ Тл, $H_c = 550$ кА/м, $W_{\max} = 120$ кДж/м³. Свойства промышленных образцов ниже предельных значений.

Перспективы использования таких сплавов велики. Основные недостатки сплавов - плохие механические свойства (высокая хрупкость), использование дефицитных материалов и высокая стоимость.

Другие магнитотвердые металлы. Кроме рассмотренных магнитотвердых материалов применяются традиционные материалы для постоянных магнитов - мартенситные стали, а также пластически деформируемые сплавы.

Мартенситом называют особый вид микроструктуры стали, который получают при быстром ее охлаждении (закалке). Образование мартенсита (200 °С), который имеет пластинчатую форму, сопровождается объемными изменениями, созданием больших внутренних напряжений, что приводит к появлению большой коэрцитивной силы. Используются только легированные мартенситные стали, которые называются по легирующей добавке: хромовые (до 3% Cr), вольфрамовые (до 8% W) и кобальтовые (до 15% Co). Значение W_{\max} для мартенситных сталей низкое (1 ...4 кДж/м³). Они имеют склонность к старению. Эти материалы имеют ограниченное применение и используются для изготовления магнитов только в наименее ответственных случаях.

Пластически деформируемые сплавы обладают высокими механическими свойствами, хорошо штампуются, режутся ножницами, обрабатываются на станках.

Наиболее распространенными являются сплавы кунифе (60% Си, 20% Ni, 20% Fe), кунико (50% Си, 21% Ni, 29% Co, остальное - Fe) и викаллой (51,0...54,0% Co, 10...13,0% V, остальное Fe). Сплавы кунифе анизотропны, применяются в виде проволоки и штамповок. Сплавы кунико дороже сплавов кунифе и применяются для изготовления магнитов сложной

конфигурации. Викаллой применяют для изготовления мелких магнитов сложной конфигурации.

Магнитные характеристики для всех сплавов следующие: остаточная индукция 0,6...0,9 Тл, коэрцитивная сила 24...57 кА/м, магнитная энергия для викаллой 4...14 кДж/м³, кунифе 2,8...7,4 кДж/м³, кунико 3,2...4,0 кДж/м.

Часть вторая. Лабораторные работы

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ В ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Цель работы: исследование зависимости разрядного напряжения в воздухе от расстояния между электродами при различной форме электродов.

Оборудование:

Аппарат АИИ-70 с выпрямительной приставкой, физическая модель воздушного промежутка.

Характеристика и паспортные данные испытательного оборудования:

1. Аппарат АИИ-70.
2. Физическая модель воздушных промежутков.

Физическая модель состоит из электродов разной формы, изолирующего основания и шунтирующего сопротивления. Шунтирующее сопротивление ограничивает ток разряда, защищая трансформатор и выпрямитель от токовых перегрузок возникающих при пробое испытуемого объекта. Выбирается из расчета 1 Ом на 1В, т.е. в нашем случае 70 кОм.

1. Краткие сведения

Атмосферный воздух является самым распространенным диэлектрическим “материалом” для создания внешней изоляции энергетического оборудования и электрических аппаратов. Изолируемые электроды располагаются на определенных расстояниях друг от друга и от земли и укрепляются в заданном положении с помощью изоляторов. Разрядное напряжение воздушного промежутка зависит от конфигурации электрического поля между электродами и давления, температуры и влажности воздуха. В связи с этим знание процессов, сопровождающих нарушение электрической прочности воздуха, является весьма важным.

Электрические поля разделяют на однородные, слабонеоднородные и резконеоднородные. В однородном поле его напряженность постоянна вдоль силовых линий. Слабонеоднородным можно назвать поле, в котором напряженность изменяется вдоль силовых линий не более чем в 2–3 раза. При больших значениях изменения напряженности электрического поля имеем резконеоднородное поле. Степень неоднородности электрического поля между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности K_n , который равен отношению максимальной напряженности $E_{\text{макс}}$ к средней напряженности $E_{\text{ср}}$ поля между электродами:

$$K_n = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}} \quad (1.1)$$

Средняя напряженность есть отношение напряжения U , приложенного к электродам, к расстоянию между электродами S .

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{S} \quad (1.2)$$

Максимальная напряженность зависит от формы, размеров электродов, способа их подключения и расстояния между ними.

Рассмотрим промежуток между двумя электродами в газе с однородным полем. Если в этом промежутке появился электрон, то, двигаясь к аноду, при достаточной напряженности электрического поля он может при столкновении ионизировать молекулу газа. В результате этого появляется новый свободный электрон, который вместе с начальным ионизирует новые молекулы, и число свободных электронов непрерывно нарастает. Процесс роста числа электронов, движущихся к аноду, получил название лавины электронов. Интенсивность размножения электронов в лавине количественно характеризуется коэффициентом ударной ионизации, численно равным числу ионизаций, производимых электронами на пути в 1 см по направлению электрического поля.

В однородном поле число электронов в лавине:

$$n = e^{\alpha x} \quad (1.3)$$

где n – число электронов в лавине; x – расстояние, пройденное лавиной; α – коэффициент ударной ионизации.

$$\alpha = \frac{0,2}{\delta}(E - 24,5\delta)^2 \quad (1.4)$$

где δ – относительная плотность воздуха,

$$\delta = \frac{PT_0}{P_0T} \quad (1.5)$$

где P и T – давление и температура в условиях опыта, P_0 и T_0 – нормальные атмосферные условия, $P_0 = 760$ мм рт. ст., $T_0 = 293$ К.

Под действием внешних ионизаторов (космические частицы, радиоактивное излучение земли, ультрафиолетовое излучение солнца) в промежутке между электродами непрерывно возникают свободные первичные электроны, которые дают начало лавинам электронов. После достижения лавиной анода процесс может прекратиться, особенно при небольшой длине промежутка. Для поддержания лавинного процесса должен появиться хотя бы один вторичный эффективный электрон, вызывающий появление новых лавин. Такой электрон может образоваться вновь в результате действия внешнего ионизатора, в этом случае разряд называется несамостоятельным. Если же вторичный эффективный электрон возникает даже в отсутствие внешнего ионизатора, разряд называется самостоятельным. При самостоятельной форме разряда лавинный процесс возобновляется, поскольку сама первичная лавина создает условия для его возобновления:

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

2) возбужденные атомы и молекулы, образующиеся наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить как к фотоионизации в объеме промежутка, так и к фотоэмиссии электронов из катода.

Образующиеся таким образом вторичные электроны приведут снова к образованию лавин в разрядном промежутке.

Условие самостоятельности разряда в однородном поле можно записать

$$\gamma e^{\alpha S} \geq 1 \quad (1.6)$$

где S – расстояние между электродами; γ – коэффициент вторичной ионизации.

Напряжение, при котором в промежутке выполняется условие самостоятельности разряда, называют начальным напряжением. В процессе развития лавины непрерывно увеличивается число электронов и положительных ионов, при этом напряженность электрического поля на фронте лавины возрастает, а в хвосте лавины уменьшается (рис. 1.1).

*Рисунок 1.1 Искажение электрического поля в промежутке
создаваемое лавиной электронов*

1 – средняя напряженность без лавины, 2 – результирующая напряженность

При прохождении лавиной некоторого критического пути $x_{кр}$ напряженность в хвосте лавины уменьшается настолько, что становится невозможной ударная ионизация. Находящиеся в хвосте лавины отставшие электроны вместе с положительными ионами создают плазменное образование, дающее начало возникновению стримерного канала. В зависимости от условий стример может быть связан с электродом или не связан. Характерной его особенностью, в любом случае, является наличие избыточного заряда на конце, создающего местное усиление электрического поля и обеспечивающего непрерывное удлинение плазменного канала.

Критерием перехода лавины в стример является соизмеримость напряженности электрического поля, создаваемого лавиной электронов

$$E = E_0 - E_{л} \quad (1.7)$$

где E_0 – напряженность внешнего поля; $E_{л}$ – напряженность, создаваемая лавиной.

Напряженность $E_{л}$ определяется по формуле

$$E_{л} = \frac{en}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.8)$$

где e – заряд электрона; n – число электронов в лавине;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

r – радиус лавины.

В однородном поле условие самостоятельности разряда выполняется при начальном напряжении, которое всегда совпадает со статистическим разрядным напряжением. В слабонеоднородных полях эффективный коэффициент ударной ионизации $\alpha_{эфф} > 0$ практически по всей длине промежутка, поэтому при выполнении самостоятельности разряда промежуток пробивается, и начальное напряжение также равно разрядному.

Типовым промежутком со слабонеоднородным полем является промежуток между двумя шарами, который получил широкое распространение в мировой практике как универсальный прибор для измерения амплитудных значений постоянного, переменного и импульсного

напряжения. Установлено, что для соблюдения точности измерений в пределах $\pm 3\%$ максимально допустимое значение отношения S/D (D – диаметр шара) при измерениях не должно превышать 0,5. В этом случае неоднородность поля невелика и в первом приближении его можно считать квазиоднородным ($K_n \approx 1$). При увеличении расстояния между шарами ($S/D > 0,5$) неоднородность поля (и соответственно K_n) возрастает и заметно влияет на величину разрядного напряжения, что позволяет оценить коэффициент неоднородности электрического поля. Напряженность поля в этом случае имеет максимальное значение на поверхности электродов, а минимальное – в середине промежутка.

Основным диэлектриком для создания внешней изоляции линий электропередачи и высоковольтного оборудования, работающего в открытых распределительных устройствах электрических станций и подстанций, является воздух при атмосферных условиях.

При нормальных атмосферных условиях электрическая прочность воздушных промежутков невелика и в однородном электрическом поле при нормальных условиях равна 30 кВ/см. Электрическое поле реальных изоляционных конструкций в большинстве случаев является неоднородным, и электрическая прочность воздушных промежутков значительно уменьшается. Это связано с особенностями развития разряда в неоднородных полях.

При приложении к воздушному промежутку высокого напряжения происходит эмиссия электронов из катода, их ускорение в электрическом поле и ионизация атомов и молекул воздуха, что приводит к появлению большого количества носителей зарядов в лавинах, которые преобразуются в стримеры. В результате этого при некоторой величине приложенного напряжения в воздухе формируется плазменный разрядный канал, который перемикает промежуток. Минимальное напряжение, при котором происходит полная потеря диэлектриком изолирующих свойств называется разрядным напряжением (U_p).

В неоднородных и резконеоднородных полях ионизация начинается только в части промежутка с наибольшей напряженностью поля. Возникший в этих областях самостоятельный разряд называется коронным разрядом, а начальное напряжение – напряжением зажигания коронного разряда. В слабонеоднородных полях ($K_n = E_{\max}/E_{\text{ср}} \leq 3$) коронный разряд неустойчив и быстро переходит в полный пробой промежутка. В таких полях напряжение зажигания коронного разряда близко или совпадает с U_p .

В резконеоднородных полях ($K_n > 3$) ионизация и коронный разряд занимают незначительную часть промежутка вблизи электрода с меньшим радиусом, коронный разряд является устойчивым, и разрядное напряжение может быть существенно выше коронного. Возникновение стримерного коронного разряда сопровождается свечением области ионизации, потрескиванием и появлением запаха озона. Коронный разряд может иметь две формы – лавинную и стримерную. Лавинной называется такая форма разряда, при которой в промежутке развиваются лавины электронов. При этом напряженность поля зарядов каждой из лавин значительно меньше напряженности внешнего поля. Зона ионизации при большом числе лавин имеет более или менее однородную структуру, что приводит к выравниванию электрического поля в промежутке за счет образующегося объемного заряда, знак которого совпадает со знаком "острого" электрода.

При более интенсивной, стримерной форме разряда, кроме лавин электронов в промежутке развиваются стримерные каналы. Если поле зарядов лавины становится соизмеримым с внешним электрическим полем в промежутке, то лавины электронов преобразуются в стример. У головки стримера происходит интенсивная ионизация, обеспечивающая прорастание стримера в глубь промежутка. Коронный разряд, распространяющийся только в части промежутка между электродами, еще не означает потерю электрической прочности, но приводит к значительным потерям энергии, коррозии провода, арматуры и изоляции, вызывает появление шума и

радиопомех. Поэтому при работе высоковольтных установок интенсивность коронного разряда необходимо снижать.

Величина разрядного напряжения зависит от длины промежутка, размеров и формы электродов, способа их подключения, плотности и вида газа, полярности и частоты напряжения. Расчет разрядного напряжения для некоторых форм электродов в сантиметровых промежутках можно проводить по приближенным формулам.

Для электродной системы острие - плоскость:

$$U_p = (7 + 3,36S)\delta \quad (1.9)$$

Для электродной системы плоскость – плоскость:

$$U_0 = 24,5\delta S + 6,4\sqrt{\delta S} \quad (1.10)$$

Для электродной системы шар – шар:

$$U_0 = \frac{1}{f} \delta \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{rS}} \right) d \quad (1.11)$$

где S – расстояние между электродами, см.

В реальных условиях изоляционные конструкции имеют самые разнообразные конфигурации и размеры, и как следствие, различные электрические поля. Поэтому исследование разрядных напряжений и напряжений коронного разряда для различных форм электродных систем и разных межэлектродных расстояний представляет большой практический интерес. Для точного сопоставления результатов измерений, проведенных при различных условиях внешней среды (давление, температура и влажность воздуха), U_p корректируют, приводя к нормальным условиям.

Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы.

См. общие правила по ТБ для зала ВН

2. Порядок проведения лабораторной работы

Ознакомиться со схемой установки, расположением её элементов, правилами безопасности при работе на установке. Проводить работу придерживаясь следующих пунктов:

1. Осмотреть аппарат АИИ-70 на предмет целостности заземления.
2. Установить необходимые испытательные образцы на физическую модель или изменить расстояние между образцами.
3. Проверить правильность сборки схемы.
4. Включить вводный автоматический выключатель питающей цепи 380/220 В высоковольтного отсека и магнитный пускатель блокировки.
5. Подсоединить аппарат АИИ-70 к сети через штепсельный разъем.
6. Включить автоматический выключатель аппарата АИИ-70.
7. Плавно со скоростью 1 кВ/с. поднять напряжение установки до момента пробоя испытуемых образцов.
8. В момент пробоя произвести отсчет показания вольтметра.
9. Снизить напряжение установки до нуля.
10. Отключить установку от сети и создать видимый разрыв при помощи штепсельного разъема.
11. Отключить вводный автоматический выключатель.

Только после выполнения этих операций можно проводить замену электродов или изменять расстояния между ними. Новый эксперимент выполняется в той же последовательности.

Обработка результатов и анализ эксперимента

1. Рассчитать значения пробивных напряжений $U_{расч}$ по формулам (1.9), (1.10) и (1.11).
2. Провести три опыта при переменном напряжении промышленной частоты и экспериментально получить значения пробивного напряжения для промежутков: а) плоскость - плоскость; б) сфера - сфера; в) стержень - плоскость.
3. Результаты занести в табл. 1.1.

4. По данным табл. 1.1 построить графические зависимости $U_w = f(S)$
5. Сопоставить результаты с расчётными.

Таблица 1.1 Значения пробивного напряжения для промежутка стержень - плоскость

Форма электродов	U _{пр.и} , кВ при расстоянии между электродами, см				U _{пр. ср.} , кВ	$E_{np.cр.} = \frac{U_{np.cр.}}{S}$, кВ/мм
	1	2	3	4		

3. План составления отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткую информацию о развитии разряда в воздушном промежутке. Определение начального напряжения и напряжения пробоя.
4. Краткое описание установки, используемой в работе, ее электрической схемы.
5. Таблицы и графики измерений и результаты вычислений.
6. Выводы по работе.

Перед началом выполнения работы студенты должны:

1. Сдать преподавателю для проверки отчет по предыдущей лабораторной работе
2. Получить допуск по теоретической части ТБ у преподавателя.

4. Контрольные вопросы

1. Для каких целей вводится поправка на относительную плотность воздуха?
2. Почему в однородном поле отсутствует коронная форма разряда?
3. Какие параметры электродной системы влияют на максимальную и среднюю напряженность электрического поля?

4. Как классифицируется и чем определяется степень неоднородности электрического поля?

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Цель работы: экспериментальное исследование разрядных напряжений в воздухе с различной конфигурации электрического поля (однородное, неоднородное).

Оборудование:

Аппарат АИИ-70 с выпрямительной приставкой, физическая модель воздушного промежутка.

Характеристика и паспортные данные испытательного оборудования:

1. Аппарат АИИ-70.
2. Высоковольтный-диодный выпрямитель
3. Физическая модель воздушных промежутков.

Физическая модель состоит из электродов разной формы, изолирующего основания и шунтирующего сопротивления. Шунтирующее сопротивление ограничивает ток разряда, защищая трансформатор и выпрямитель от токовых перегрузок возникающих при пробое испытуемого объекта. Выбирается из расчета 1 Ом на 1В, т.е. в нашем случае 70 кОм.

1. Краткие сведения

В промежутке острие – плоскость формирование разряда зависит от полярности острия.

При положительной полярности острия имеющиеся в промежутке электроны, двигаясь к острию в область сильного поля, совершают ударную ионизацию и образуют лавину электронов. Когда лавина доходит до острия, электроны лавины нейтрализуются на аноде, а положительные ионы вследствие малой скорости движения остаются у острия и создают положительный объемный заряд, который обладает собственным

электрическим полем. Взаимодействуя с внешним полем в промежутке, положительный объемный заряд ослабляет поле вблизи острия и усиливает его во внешнем пространстве (рис. 1.2.а).

Рис. 1.2 Влияние полярности острия на распределение напряженности

а) положительная полярность острия, б) отрицательная полярность острия

E – напряженность внешнего поля; $E_{об}$ – напряженность объемного положительного заряда; $E_{рез}$ – результирующая напряженность в промежутке после ионизации

Если напряжение между электродами достаточно велико, то возникает лавина электронов справа от объемного заряда, электроны которой, смешиваясь с положительными ионами объемного заряда, создают анодный стример, заполненный плазмой. Положительные заряды этой лавины будут располагаться на головке стримера и создавать область повышенной напряженности во внешнем пространстве. Наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера, постепенно удлиняя его. Стример прорастает к катоду, вызывая пробой промежутка при сравнительно малой величине разрядного напряжения.

При отрицательной полярности острия электрическое поле непосредственно у острия приводит к эмиссии электронов с катода, которые сразу попадают в сильное поле и производят ударную ионизацию, образуя большое число лавин. Электроны лавин, перемещаясь в слабое поле у анода, теряют скорость, захватываются нейтральными молекулами, становятся отрицательными ионами, рассеянными в пространстве.

Положительные ионы лавин образуют объемный заряд у острия, который, взаимодействуя с внешним полем, будет увеличивать напряженность непосредственно у острия и уменьшать во внешнем пространстве (рис. 1.2.б). Усиленное поле у острия приводит к усилению эмиссии электронов с поверхности катода, которые, смешиваясь с положительным объемным зарядом, образуют у катода катодный стример. Следовательно, коронный разряд у катода зажигается при напряжении несколько меньшем, чем при положительной полярности острия.

Вследствие большого числа начальных лавин у катода плазменный канал здесь представляет собой узкий слой высокой напряженности поля, где осуществляется лавинный процесс и рождаются электроны, выносимые во внешнее пространство.

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

При дальнейшем увеличении напряжения происходит ионизация справа от плазменного слоя, большое число образующихся лавин приводит к удлинению стримера. Средняя скорость продвижения катодного стримера меньше, чем анодного.

В силу рассмотренных выше особенностей развитие стримера при отрицательном острие происходит с большими трудностями, поэтому разрядное напряжение при отрицательной полярности острия больше, чем при положительной полярности (в 2 – 2,5 раза).

Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы.

См. общие правила по ТБ для зала ВН

2. Порядок проведения лабораторной работы

Ознакомиться со схемой установки, расположением её элементов, правилами безопасности при работе на установке. Проводить работу придерживаясь следующих пунктов:

1. Осмотреть аппарат АИИ-70 на предмет целостности заземления.
2. Установить необходимые испытательные образцы на физическую модель или изменить расстояние между образцами.
3. Проверить правильность сборки схемы.
4. Включить вводный автоматический выключатель питающей цепи 380/220 В высоковольтного отсека и магнитный пускатель блокировки.
5. Подсоединить аппарат АИИ-70 к сети через штепсельный разъем.
6. Включить автоматический выключатель аппарата АИИ-70.
7. Плавно со скоростью 1 кВ/с. поднять напряжение установки до момента пробоя испытуемых образцов.
8. В момент пробоя произвести отсчет показания вольтметра.
9. Снизить напряжение установки до нуля.
10. Отключить установку от сети и создать видимый разрыв при помощи штепсельного разъема.
11. Отключить вводный автоматический выключатель.

Только после выполнения этих операций можно проводить замену электродов или изменять расстояния между ними. Новый эксперимент выполняется в той же последовательности.

Обработка результатов и анализ эксперимента

1. Экспериментально получить значения пробивного напряжения для промежутка стержень - плоскость при положительной полярности стержня и при отрицательной полярности.

2. Результаты занести в табл. 1.2.

3. По данным табл. 1.2 построить графические зависимости $U_{np} = f(S)$

Таблица 1.2 Значения пробивного напряжения для промежутка стержень - плоскость

Форма электродов	U _{пр.ср.} , кВ при расстоянии между электродами, см				U _{пр. ср.} , кВ	$E_{np.cр.} = U_{np.cр.} / S$, кВ/мм
	1	2	3	4		

3. План составления отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.

2. Цель работы.

3. Краткую информацию о развитии разряда в воздушном промежутке. Определение начального напряжения и напряжения пробоя.

4. Краткое описание установки, используемой в работе, ее электрической схемы.

5. Таблицы и графики измерений и результаты вычислений.

6. Выводы по работе.

Перед началом выполнения работы студенты должны:

1. Сдать преподавателю для проверки отчет по предыдущей лабораторной работе

2. Получить допуск по теоретической части ТБ у преподавателя.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент неоднородности электрического поля?

2. Что называется лавиной электронов?

3. В чем заключается условие самостоятельности разряда в газах?

4. Что называется коэффициентом ударной ионизации?
5. Почему при измерении напряжения используются электроды шар–шар, а не плоскость–плоскость?

3. ЭФФЕКТ ПОЛЯРНОСТИ И ВЛИЯНИЕ БАРЬЕРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ НА ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Цель работы: исследование влияния полярности электродов и влияния барьеров на пробивное напряжение воздушного промежутка острие–плоскость.

Оборудование:

Аппарат АИИ-70 с выпрямительной приставкой, физическая модель воздушного промежутка.

Характеристика и паспортные данные испытательного оборудования:

1. Аппарат АИИ-70.
2. Высоковольтный-диодный выпрямитель
3. Физическая модель воздушных промежутков.

Физическая модель состоит из электродов разной формы, изолирующего основания и шунтирующего сопротивления. Шунтирующее сопротивление ограничивает ток разряда, защищая трансформатор и выпрямитель от токовых перегрузок возникающих при пробое испытуемого объекта. Выбирается из расчета 1 Ом на 1В, т.е. в нашем случае 70 кОм.

1. Краткие сведения

Воздушная изоляция играет важную роль в различных высоковольтных конструкциях, поэтому оценка величин разрядных напряжений в воздушных промежутках имеет большое значение в создании высоковольтной изоляции. Разрядные напряжения при данном расстоянии между электродами зависят от степени неравномерности электрического

поля, времени воздействия напряжения, полярности электродов, атмосферных условий и других факторов. В слабонеоднородных полях, где максимальный и средний градиенты мало отличаются друг от друга, влияние полярности невелико. В резконеоднородном поле коронное напряжение намного ниже разрядного, полярность при несимметричных электродах существенно влияет на величину разрядного напряжения.

На практике увеличение разрядных напряжений изоляционных промежутков достигается помещением в промежуток барьеров из твердого диэлектрика (электрокартон, гетинакс и др.). При положительном острие положительные ионы оседают на барьер и растекаются по его поверхности тем равномернее, чем дальше от острия расположен барьер. Это приводит к более равномерному распределению напряженности в промежутке между барьером и плоскостью и, следовательно, к значительному увеличению разрядного напряжения (рис. 1.3).

а)

б)

Рис. 1. Распределение напряженности поля в промежутке при наличии

барьера: a – положительная полярность острия; b – отрицательная полярность острия
1 – без барьера, 2 – с барьером

При отрицательной полярности острия электроны, двигаясь от острия, попадают на барьер, теряют скорость, и большинство из них становятся отрицательными ионами. На барьере в этом случае появляется концентрированный отрицательный заряд, увеличивающий напряженность поля не только между положительным объемным зарядом у острия и барьером, но и во внешнем пространстве. Степень влияния отрицательного концентрированного заряда будет тем больше, чем дальше от острия установлен барьер.

Поэтому при отрицательной полярности острия увеличение разрядного напряжения в промежутке при наличии барьера будет незначительным, а если барьер установлен ближе к плоскости, то разрядное напряжение будет даже меньше, чем в промежутке без барьера. При расположении барьера в средней части промежутка разрядные напряжения при отрицательной и положительной полярностях близки.

Таким образом, барьеры в промежутке устанавливаются на таком оптимальном расстоянии от острия, при котором разрядные напряжения максимальны ((0,15 - 0,3) длины промежутка между электродами). Причем при положительной полярности острия разрядное напряжение может увеличиться в 2 – 2,5 раза по сравнению с промежутком без барьера, а при отрицательной полярности коронирующего электрода – в 1,2 – 1,3 раза.

Если могут коронировать оба электрода разрядного промежутка, то барьеры устанавливаются вблизи обоих электродов.

При расположении барьера в непосредственной близости от положительного острия роль его уменьшается вследствие резкой неравномерности распределения зарядов на барьере. Напряженность поля

оказывается достаточной для того, чтобы ионизационные процессы проходили по другую сторону барьера.

Упрочняющий эффект барьеров имеет место при постоянном, переменном и импульсном напряжениях. Однако при импульсных напряжениях барьерный эффект выражен слабее, так как барьер не успевает за короткое время зарядиться.

Барьеры широко используются в высоковольтных конструкциях, работающих как в воздухе, так и в масле (высоковольтные вводы, трансформаторы и др.).

Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы.

См. общие правила по ТБ для зала ВН

2. Порядок проведения лабораторной работы

Ознакомиться со схемой установки, расположением её элементов, правилами безопасности при работе на установке. Проводить работу придерживаясь следующих пунктов:

1. Осмотреть аппарат АИИ-70 на предмет целостности заземления.
2. Установить необходимые испытательные образцы на физическую модель или изменить расстояние между образцами.
3. Проверить правильность сборки схемы.
4. Включить вводный автоматический выключатель питающей цепи 380/220 В высоковольтного отсека и магнитный пускатель блокировки.
5. Подсоединить аппарат АИИ-70 к сети через штепсельный разъем.
6. Включить автоматический выключатель аппарата АИИ-70.
7. Плавно со скоростью 1 кВ/с. поднять напряжение установки до момента пробоя испытуемых образцов.
8. В момент пробоя произвести отсчет показания вольтметра.
9. Снизить напряжение установки до нуля.

10. Отключить установку от сети и создать видимый разрыв при помощи штепсельного разъема.

11. Отключить вводный автоматический выключатель.

Только после выполнения этих операций можно проводить замену электродов или изменять расстояния между ними. Новый эксперимент выполняется в той же последовательности.

Обработка результатов и анализ эксперимента

1. При положительной полярности стержня установить расстояние 4 см между стержнем и плоскостью и ввести в промежуток диэлектрический барьер (h -расстояние от стержня до барьера) при значениях: $h = 1$ см; 2 см; 3 см, 4 см. экспериментально получить значения пробивного напряжения

2. Результаты занести в табл. 1.3.

3. По данным табл. 1.3 построить графические зависимости $U_{np} = f(h)$.

Таблица 1.3 значения пробивного напряжения для промежутка стержень – плоскость при наличии барьера

Форма электродов	U _{пр.и} , кВ при расстоянии между барьером и плоским электродами, см					U _{пр. ср.} , кВ	$E_{np.cр.} = \frac{U_{np.cр.}}{S}$, кВ/мм
	0	1	2	3	4		

3. План составления отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1 .Титульный лист.

2.Цель работы.

3.Краткую информацию о развитии разряда в воздушном промежутке. Определение начального напряжения и напряжения пробоя.

4.Краткое описание установки, используемой в работе, ее электрической схемы.

5.Таблицы и графики измерений и результаты вычислений.

6. Выводы по работе.

Перед началом выполнения работы студенты должны:

1. Сдать преподавателю для проверки отчет по предыдущей лабораторной работе

2. Получить допуск по теоретической части ТБ у преподавателя.

4. Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависят разрядные напряжения промежутков?

2. В каких промежутках полярность электродов при наличии барьера влияет на величину разрядного напряжения?

3. Как можно увеличить разрядные напряжения изоляционных промежутков?

4. Из какого материала выполняется барьер?

5. На каком оптимальном расстоянии от острия устанавливается барьер в межэлектродном промежутке?

4. ИЗМЕРЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучить метод измерения величины тангенса диэлектрических потерь.

Оборудование: набор твердых диэлектрических материалов, мост переменного тока Р 5026, конденсатор Р 5023, измерительный трансформатор НОМ –10 кВ, ЛАТр.

Паспортные данные и характеристика оборудования:

Мост Р 5026

Мост переменного тока предназначен для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляции промышленных установок (изоляторов, вводов, конденсаторов, трансформаторов, генераторов, компенсаторов и т. п.) в эксплуатационных условиях непосредственно на месте установки оборудования

Пределы измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, пределы допустимой основной погрешности измерения емкости и тангенса угла потерь, пределы рабочего напряжения приведены в таблице 2.8.

Изменение погрешности моста при изменении температуры окружающего воздуха от нормальной 15 – 25 °С до любой температуры в пределах рабочего диапазона не превышает 0,5 предела допустимой основной погрешности, в диапазоне температур от 1 до 10 °С и от 35 до 40 °С не превышает предела допускаемой основной погрешности на каждые 10 °С изменение температуры.

Таблица 1.4. Основные технические данные моста Р 5026

Пределы измерения	Пределы допускаемой погрешности измерения	Пределы рабочего напряжения, кВ	Схема измерения	Диапазон рабочих температур, °С
-------------------	---	---------------------------------	-----------------	---------------------------------

$C_x, \text{ПФ}$	$\text{tg}\delta x$	$C_x, \%$	$\text{tg}\delta x$			
10 – 1000	$1,10^{-4}$ – 0,1	$\pm\left(0,5+\frac{100}{C}\right)$	$\pm 0,01\text{tg}\delta$ $+2\cdot 10^{-4}$	5–10	Прямая	10–35 °С
100 – 10000	$1,10^{-4}$ – 1,0	$\pm\left(0,5+\frac{50}{C}\right)$	$\pm 0,01\text{tg}\delta$ $+1\cdot 10^{-4}$	3–10	Прямая	10–35
10^5 – 10^6	$5,10^{-4}$ – 1,0	$\pm\left(2,5+\frac{50}{C}\right)$	$\pm 0,05\text{tg}\delta$ $+3\cdot 10^{-4}$	3–5	Прямая перевернутая	от –10 до +40

Устройство моста P5026

Мост состоит из панели У-1, нуль-индикатора У-2, магазина сопротивлений У-3, магазина емкостей У-4.

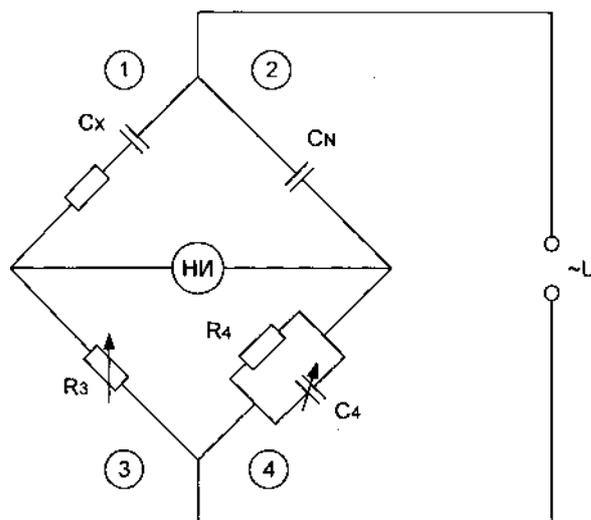


Рис.1.4. Электрическая схема моста P 5026

Магазин сопротивления У-3 имеет три декады (20x100; 9x10; 9x1 Ом) и плавно регулируемый потенциометр со шкалой и ценой деления 0,02 Ом. Погрешность корректировки сопротивления до номинального значения первых трех декад не превышает 0,1%, погрешность градуировки последней декады не превышает 0,01% Ом.

Нуль-индикатор предназначен для индикации равновесия моста, представляет собой чувствительный, транзисторный, избирательный усилитель, на выходе которого включен стрелочный прибор.

Чувствительность не менее 2 мкА/мкВ и изменяется ступенями через 30 дБ. Входное сопротивление нуль-индикатора не менее 300 Ом.

Магазин емкостей У-4 состоит из трех декад: 9x0,1; 9x0,01; 9x0,001 мкФ и воздушного конденсатора переменной емкости. Погрешность корректировки емкости декад магазина 0,2%.

Панель У-1. На панели расположены переключатели пределов измерения на высоком и на низком напряжении, рисунок 1 - «А», блокировочная кнопка переключателя - «К», переключатель полярности нуль-индикатора и знака тангенса угла диэлектрических потерь - «Б», переключатель плеча R4, разрядники, гнездо для подключения шнура питания, зажимы подключения C_x и C_0 , образцовые конденсаторы для низковольтной схемы измерения, элементы питания нуль-индикатора и шунтирующие сопротивления.

Корпус моста, его наружная и лицевая панель служат внешним электростатическим экраном и при работе моста заземляются.

Переключатель пределов «А» обеспечивает выбор схемы моста для работы на высоком (красная маркировка), и на низком (черная маркировка) напряжении. Для исключения ошибки от неправильных действий оператора перевод работы схемы с высокого напряжения на низкое и обратно возможен лишь при нажатой кнопки «К». Переключатель «Б» обеспечивает два включения для измерения положительного $tg\delta$. Каждое такое включение имеет два положения «1» и «2». При переходе из положения «1» в положение «2» изменяется полярность присоединения нуль-индикатора.

Образцовый воздушный конденсатор Р 5023

Образцовый конденсатор, применяемый при работе моста на высоком напряжении, конструктивно представляет собой воздушный конденсатор с коаксиальным расположением электродов. Наружный электрод является высокопотенциальным, внутренний – низкопотенциальным. Оба электрода укреплены через изоляторы на трубе, проходящей в осевой части цилиндров.

Трансформатор напряжения НОМ –10

Трансформатор напряжения однофазный двухобмоточный с естественным масляным охлаждением представляет собой преобразователь переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Технические данные: номинальное напряжение вторичной обмотки 100 В; номинальное напряжение первичной обмотки 10000 В; максимальная мощность 640 ВА.

Трансформатор напряжения состоит из магнитопровода и двух обмоток, которые помещаются в бак, заполненный трансформаторным маслом. На крышке трансформатора смонтированы вводы первичного и вторичного напряжения, размещена пробка для доливки трансформаторного масла.

ЛАТр (лабораторный автотрансформатор) - предназначен для регулирования напряжения от 0 до 240 В.

Краткие теоретические сведения

Тангенс угла диэлектрических потерь – важнейший параметр изоляции. От величины $tg\delta$ зависят потери в диэлектрике. Возрастание $tg\delta$ в процессе эксплуатации происходит в результате общего старения изоляции и может привести к пробое.

Величина диэлектрических потерь:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta, \quad (1.12)$$

где U – действующее значение испытательного переменного напряжения;

ω – угловая частота;

C – емкость изоляции;

δ – угол диэлектрических потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь представляет собой отношение активной составляющей тока, протекающего в изоляции, к реактивной составляющей:

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_c}, \quad (1.13)$$

где δ – угол между векторами полного тока и реактивной составляющей тока в векторной диаграмме токов в изоляции (рис.1.5.).

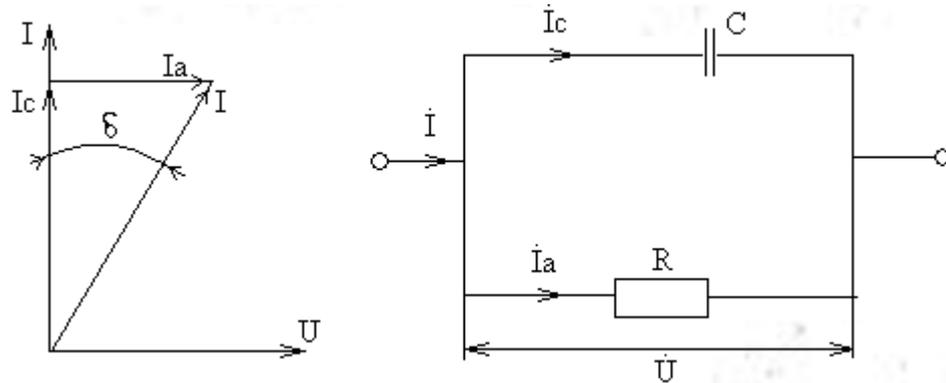


Рис.1.5. Схема замещения и векторная диаграмма токов в изоляции

Увеличение тангенса угла потерь обусловлено увлажнением изоляции, ионизацией газовых включений в расслоившейся изоляции, поверхностным загрязнением изоляции. Значение $\operatorname{tg}\delta$ так же зависит от температуры, испытательного напряжения и его частоты.

Тангенс угла диэлектрических потерь – удельная величина, характеризующая диэлектрические потери в единице объема изоляции. Поэтому его существенное возрастание наблюдается только при увеличении потерь значительной части объема изоляции. Если же потери возросли в малой части объема изоляции, то $\operatorname{tg}\delta$ изменился незначительно.

Покажем это для случаев параллельного и последовательного расположения диэлектриков с различными значениями тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 1.6).

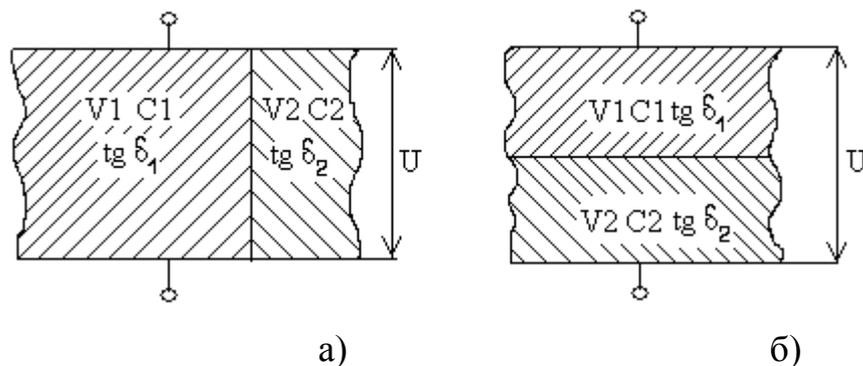


Рис. 1.6. Параллельное (а) и последовательное (б) расположение диэлектриков

В первом случае (параллельное расположение):

$$tg\delta = \frac{C_1 tg\delta_1 + C_2 tg\delta_2}{C_1 + C_2} \quad (1.14)$$

Если объем V_2 значительно меньше объема V_1 , то и $C_2 \ll C_1$. Тогда

$$tg = tg\delta_1 + \frac{C_2}{C_1} tg\delta_2 \quad (1.15)$$

Из (1.15) следует, что результирующий тангенс угла диэлектрических потерь будет незначительно превышать тангенс угла потерь основного объема изоляции.

При последовательном расположении слоев:

$$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_1 + C_1 tg\delta_2}{C_1 + C_2} \quad (1.16)$$

Если слой с повышением тангенса угла потерь имеет незначительную толщину, то $C_2 = C_1$. В этом случае:

$$tg = tg\delta_1 + \frac{C_2}{C_1} tg\delta_2, \quad (1.17)$$

так как $C_2 = C_1$, то $tg\delta = tg\delta_1$

По этой причине достоверность результатов измерения тангенса угла диэлектрических потерь применительно к неоднородной композиционной изоляции соблюдается при общем старении (увлажнение изоляции). Указанные соображения верны для вводов силовых трансформаторов, вводов трансформаторов тока.

Измерение тангенса угла производится переносными мостами.

Условие равновесия моста

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3, \quad (1.18)$$

$$\text{где } Z_1 = R_x + \frac{1}{j\omega C_x}, \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_n}, \quad Z_3 = R_3, \quad Z_4 = \frac{R_4 \cdot \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_x}}, \quad (1.19)$$

$$R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \left(\frac{R_4 \cdot \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_x}} \right) = R_3 \frac{1}{j\omega C_n} \quad (1.20)$$

Из этого равенства следует:

$$C_x = C_n \frac{R_4}{R_3}, \quad R_x = R_3 \frac{C_4}{C_n} \quad (1.21)$$

Из треугольника сопротивлений схемы замещения диэлектрика (рис.1.4) следует

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_x \cdot C_x, \quad (1.22)$$

так как $R_4 = \frac{10^4}{\pi}$, $f = 50$ Гц, $C_n = 50,05$ мкФ, то

$$\operatorname{tg} \delta = C_4, \quad C_x = \frac{159360}{R_3} \quad (1.23)$$

Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы.

См. общие правила по ТБ для лаборатории ВН

2. Порядок проведения лабораторной работы

1. Проверить правильность сборки схемы (рис.1.14).
4. Проверить надежность заземления приборов Р-5026, Р-5023, НОМ-10.
5. Проверить целостность и исправность гальванического элемента, для питания нуль-индикатора. В нормальном режиме стрелка должна показать 28 – 30 мА.
6. Дать команду «Подаю напряжение».
7. Подать напряжение 100 В на низкую обмотку трансформатора НОМ 10000/100 В.
8. Произвести измерение в соответствии с правилами работы с приборами Р- 5026, Р-5023.
9. Снять напряжение.
10. Дать команду «Напряжение снято».
11. Отключить ЛАТр от сети, сделать видимый разрыв.

12. Записать данные измерения в протокол испытания, форма которого приведена в таблице 2.10.
13. Пересоединить схему испытания.
14. Выполнить пункты 6-12.
15. Измерить температуру окружающей среды.
16. Разобрать схему.

Обработка результатов измерений и анализ экспериментов

Таблица 1.5. Форма протокола измерений

№	Тангенс угла диэлектрических потерь и емкость отдельных участков изоляции вводов	
	C_4	R_3
1		
2		
3		
4		
5		

3. План составления отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе включает в себя:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения по определению $tg\delta$.
4. Характеристику приборов использованных в лабораторной работе и описание электрической схемы.
5. Протоколы измерений и результаты вычислений.
6. Выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Методика проведения измерения тангенса угла диэлектрических потерь.

2. Дать определение тангенса угла диэлектрических потерь и вывести формулу для его нахождения.
3. Охарактеризовать оборудование, используемое в данной работе.
4. Достоинства и недостатки метода определения тангенса диэлектрических потерь, используемого в лабораторной работе.
5. При каких условиях справедливо равенство $\operatorname{tg} \delta = C_4$?

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучить метод контроля электрической прочности жидких диэлектриков по величине тангенса угла диэлектрических потерь и получить практические навыки по его применению.

Оборудование: аппарат АИМ-90, трансформаторное масло

Паспортные данные и характеристика оборудования:

Аппарат АИМ – 90. Аппарат предназначен для определения пробивного напряжения трансформаторного масла и других жидких диэлектриков. Напряжение питания сети однофазного переменного тока - 220 ± 22 В. Наибольшее действующее пробивное напряжение – 90 кВ, Потребляемая мощность не более 0,5 кВА, объем измерительной ячейки – 400 см^3 .

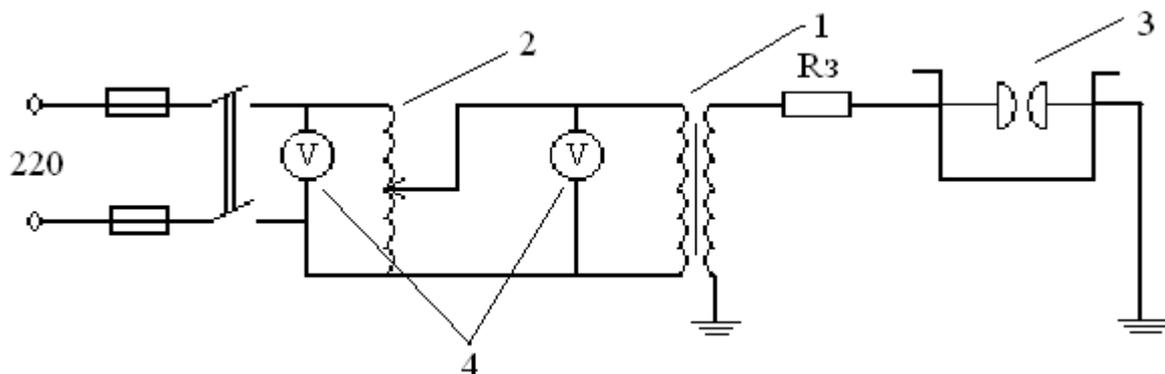


Рис.1.7.Основные элементы конструкции аппарата АИМ -90,

1 – генераторное устройство; 2 – регулятор напряжения; 3 – измерительная ячейка; 4 – измерительный прибор, сигнальные лампы, реле.

Зона аппарата, где устанавливается измерительная ячейка, имеет крышку, которая в закрытом положении замыкает блок-контакты цепи высокого напряжения. При открывании крышки происходит разрыв цепи. Подъем высокого напряжения производится регулятором напряжения с постоянной скоростью электропривода.

Трансформаторным (изоляционным) маслом заполняются баки силовых трансформаторов и реакторов, масляные выключатели, измерительные трансформаторы и вводы. Масла различных марок

существенно отличаются по своим диэлектрическим свойствам, поэтому каждое из них предназначается для заливки в оборудование определенных классов напряжения.

Трансформаторное масло подразделяется:

- на свежее сырое (без присадок), в том виде, в каком оно поставляется заводом;

- регенерированное;

- чистое, сухое (свежее или регенерированное, либо смесь масел);

- эксплуатационное (показатели которого соответствуют нормам);

- отработавшее (показатели которого не соответствуют нормам эксплуатационного масла).

Основные физико-химические и диэлектрические свойства трансформаторных масел:

электрическая прочность – одна из основных характеристик, определяется по пробивному напряжению. Для свежего масла пробивное напряжение должно быть не менее 30 кВ. Снижение пробивного напряжения свидетельствует, как правило, о загрязнении масла водой, воздухом, волокнами и другими примесями;

тангенс угла диэлектрических потерь – характеризует свойство трансформаторного масла как диэлектрика. Диэлектрические потери характеризуют его качество и степень очистки свежего масла, а в процессе эксплуатации – степень его загрязнения и старения;

цвет масла у большинства масел светло-желтый. Темный цвет свежего масла характеризует отклонения в технологии его изготовления на заводе;

механические примеси – нерастворенные вещества, содержащиеся в масле в виде осадка или в взвешенном состоянии. Это – волокна, пыль, продукты растворения в масле компонентов, применяемых в конструкции трансформатора;

влажность. Ухудшение этого показателя свидетельствует о потере герметичности трансформатора или его работе в недопустимом

нагрузочном режиме. При наличии в масле эмульсии воды электрическая прочность масла мала. С повышением температуры влага в масле постепенно переходит в раствор, в результате чего электрическая прочность возрастает, с дальнейшим повышением температуры она снова падает;

температура вспышки масла – характеризует степень его испаряемости. Температура вспышки для обычных трансформаторных масел колеблется в пределах 130...150 ° С. В отношении пожарной безопасности большую роль играет *температура самовоспламенения* - это температура, при которой масло при наличии воздуха над поверхностью загорается самопроизвольно без поднесения пламени и составляет 350... 400 ° С;

кислотное число – это количество едкого калия (КОН), выраженного в миллиграммах, необходимое для нейтрализации свободных кислот в 1 г. Масла. Этот показатель характеризует старение масла, о чем свидетельствует появление в нем кислотных соединений. Кислотное число не должно превышать 0,25 мг КОН на 1 г. масла.

водорастворимые кислоты и щелочи, содержащиеся в масле свидетельствуют о его низком качестве. Они могут образовываться в процессе изготовления при нарушении технологии производства, а также при эксплуатации в результате его окисления. Эти кислоты вызывают коррозию металла и ускоряют старение изоляции;

стабильность проверяется в эксплуатации при получении партий свежего масла путем проведения его искусственного старения. Стабильность масла характеризует его срок службы и определяется двумя показателями – процентным содержанием осадка и кислотным числом;

температура застывания – это наибольшая температура, при которой масло застывает настолько, что при наклоне пробирки под углом 45° его уровень в течении 1 мин. не изменяется. Для трансформаторов первостепенное значение имеет охлаждение, поэтому, для их наполнения требуется масло, обладающее большей подвижностью, так как вязкое масло

будет циркулировать гораздо медленнее, не обеспечивая необходимого охлаждения трансформатора;

газосодержание масла. Повышенное содержание газа в масле приводит к ухудшению его свойств: возрастанию интенсивности окисления, снижению электрической прочности изоляции активной части трансформатора;

плотность характеризует восприимчивость масел к присадкам их гигроскопичность, сопротивляемость воздействию электрического поля;

вязкость характеризует подвижность масла при температурных колебаниях в трансформаторе. Ухудшение вязкости нарушает теплообмен, ускоряет старение изоляции;

показатель преломления отражает содержание в масле нафтоароматических углеводородов .

В трансформаторах изоляционные масла осуществляют одновременно две функции: диэлектрика и теплоотводящей среды. Масло обеспечивает изоляцию обмоток относительно заземленного корпуса и частей трансформаторов, находящихся под различным потенциалом.

Электрическая прочность трансформаторного масла зависит, главным образом, от содержания в них примесей, в том числе воды, газа, посторонних твердых частиц, растительных волокон и других загрязнений.

Наибольшее отрицательное воздействие оказывают вода и пыль. Пробивное напряжение недегазированного масла зависит от давления, что обусловлено наличием пузырьков воздуха.

При испытании электрической прочности масла необходимо строго соблюдать принятую методику испытания, так как форма обработки электродов, влажность среды, время выдержки масла под напряжением оказывают влияние на результаты измерения.

Таким образом, с точки зрения получения максимальной величины электрической прочности масло не должно быть влажным, содержать загрязнений, посторонних включений и должно быть тщательно высушено и дегазировано.

Подготовка к работе

Подготовка измерительной ячейки

При применении новой измерительной ячейки или после длительного хранения, при изменении типа испытываемой жидкости ячейку следует обработать растворителем. При ежедневных испытаниях или при других видах испытаний, когда пробивное напряжение не превышает установленных норм, обработка испытательной ячейки сводится к ее ополаскиванию испытываемой жидкостью. В нерабочем состоянии ячейку хранят наполненной жидким материалом, пробивное напряжение которого не превышает установленных норм для данного типа жидкости.

Подготовка пробы трансформаторного масла

За пробу принимают объем жидкого электроизоляционного материала, одновременно отобранный в один сосуд из емкости аппарата.

Пробивное напряжение трансформаторного масла определяется при температуре $15 - 20^{\circ} \text{C}$, не отличающейся от температуры помещения. Перед испытанием закрытый сосуд с пробой жидкости должен быть выдержан в помещении, в котором будут производиться испытания, до приобретения жидкостью температуры помещения, но не менее 30 мин. При этом сосуд должен быть защищен от воздействия дневного света.

Перед испытанием сосуд с пробой несколько раз осторожно переворачивают вверх дном, чтобы содержащиеся в пробе случайные примеси равномерно распределились по всему объему. После этого небольшим количеством жидкости ополаскивают ячейку, в том числе электроды, затем медленно заполняют ячейку, следя за тем, чтобы струя жидкости медленно стекала по стенке и не образовывалось пузырьков воздуха. Испытания производят через 10 мин. После заполнения ячейки.

При одном заполнении ячейки осуществляют шесть последовательных пробоев с интервалами между ними - 5 мин. После каждого пробоя при помощи стеклянной палочки жидкость между электродами осторожно

перемешивают для удаления продуктов разложения, не допуская образование воздушных пузырьков.

Пробой отмечается по образованию в масле между электродами сплошной искры и по спаданию до нуля стрелки вольтметра. Затем напряжение снижают и дают маслу отстояться в течение 1 мин. Такие пробы делают 5 раз и затем берут среднее арифметическое значение пробивного напряжения.

2. Порядок проведения работы

При выполнении лабораторной работы должны соблюдаться ТБ в зале ТВН.

Особые правила техники безопасности

1. Запрещается прерывать повышение испытательного напряжения в интервале от 60 до 90 кВ путем выключения электродвигателя на время более чем 20 с., т.к. первичная обмотка трансформатора не рассчитана на длительное протекание по не току холостого хода генераторного устройства при указанных величинах напряжения.

2. Запрещается включать высокое напряжение, если не установлены в аппарат: изоляционный барьер и ячейка с жидким диэлектриком.

3. Не допускается работать на аппарате при напряжении выше 90 кВ. При достижении во время испытания указанной величины необходимо отключить аппарат сетевой кнопкой.

Порядок работы на аппарате АИМ-90

1. Проверить заземление аппарата АИМ -90.

2. Открыть крышку аппарата, установить ячейку с трансформаторным маслом и закрыть крышку.

3. Подключить аппарат к сети 220 В.

4. Включить кнопку сети (~), при этом должна загореться подсветка зеленого сигнала.

5. Включить кнопку высокого напряжения, при этом должна загореться подсветка красного сигнала.

6. Зафиксировать величину пробивного напряжения.
7. Включить кнопку (0←) для возврата стрелки измерительного прибора в нулевое положение.
8. Дождаться возврата стрелки измерительного прибора в нулевое положение, отключить сетевой выключатель, открыть крышку и из зазора между электродами и с самих электродов при помощи чистой сухой стеклянной палочки осторожно удалить твердые продукты разложения.
9. Для одной пробы жидкого диэлектрика должно быть проведено шесть пробоев. Результаты испытаний заносят в таблицу 2.11.
10. Среднее арифметическое значение пробивного напряжения

$$U_{np} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{np_i} \quad (1.24)$$

Обработка результатов измерений и анализ экспериментов

Таблица 1.6. Протокол результатов испытания трансформаторного масла.

№ опыта	Пробивное напряжение, кВ	Среднее пробивное напряжение, кВ

Полученные результаты испытаний сравнивают с таблицей 1.6 и дают заключение о пригодности трансформаторного масла для категорий электрооборудования.

3. План составления отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе включает в себя:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.

3. Краткие теоретические сведения по испытанию трансформаторного масла.

4. Характеристику приборов использованных в лабораторной работе и описание электрической схемы.

5. Протоколы измерений и результаты вычислений.

6. Выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Назначение аппарата АИМ-90.

2. Принципиальная электрическая схема и описание методики определения пробивного напряжения трансформаторного масла.

3. Устройство и подготовка измерительной ячейки.

4. Назначение и характеристики трансформаторного масла.

5. Что такое проба трансформаторного масла?

6. Марки трансформаторных масел (пример).

7. Основные физико-химические свойства.

8. Как производится оценка контроля состояния масла?

9. Каковы требования к качеству масла?

10. Периодичность испытания масла.

Часть вторая Задачи для самостоятельной работы по курсу «Электроматериаловедение»

Методические указания по решению задач.

Задачи, предлагаемые для решения, базируются на знании теоретического материала курса. Задачи составлены с учетом того, что студенты понимают начальные условия и знают стандартные величины, используемых показателей. Например, все данные по материалам даются при нормальной температуре, которая равна 20 градусам Цельсия. При использовании старых справочников необходимо обращать внимание на соответствие единиц систем измерения. Перед текстом задач даны основные формулы раздела, а после задач минимально необходимые справочные данные, однако, это не освобождает студентов от поиска других формул и данных.

I Раздел “ Электрическая прочность диэлектриков.

Диэлектрические потери”

Напряженность поля:

$$E = \frac{Q}{4\pi r^2 \varepsilon \varepsilon_0}, \quad (I.1)$$

где Q – заряд;

r – расстояние до заряда;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

Заряд на ёмкости:

$$Q = CU, \quad (I.2)$$

где Q – заряд, К;

C – ёмкость, Ф;

U – напряжение, В.

Ёмкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (I.3)$$

где S – площадь пластин, м²;

d – расстояние между ними, м;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков при параллельном включении компонентов:

$$\varepsilon_r = \theta_1 \varepsilon_{r1} + \theta_2 \varepsilon_{r2}, \quad (I.4)$$

где θ_1 – объёмная концентрация первого компонента смеси;

θ_2 – объёмная концентрация второго компонента смеси;

ε_{r1} – относительная диэлектрическая проницаемость первого компонента смеси;

ε_{r2} – относительная диэлектрическая проницаемость второго компонента смеси;

Удельное объёмное сопротивление:

$$\rho = \frac{RS}{h}, \quad (I.5)$$

где R – объёмное сопротивление образца, Ом;

S – площадь электрода, м²;

h – толщина образца, м;

Удельное поверхностное сопротивление:

$$\rho_s = \frac{R_s d}{l}, \quad (I.6)$$

где R_s – поверхностное сопротивление образца материала, Ом;

d – ширина электродов;

l – расстояние между ними;

Постоянная времени разряда конденсатора:

$$\tau_0 = R_{из} C = \rho \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (I.7)$$

где $R_{из}$ – сопротивление изоляции;

ρ – удельное сопротивление;

C – емкость конденсатора.

Потери мощности в диэлектрике:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \omega C r_s = U^2 \omega^2 C^2 r_s, \quad (I.8)$$

где U – напряжение;

ω – угловая частота;

C – ёмкость диэлектрика при параллельной схеме замещения;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь;

Тангенс угла потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C r_p}, \quad (I.9)$$

где ω – угловая частота;

C и r_p – постоянные ёмкость и сопротивление, измеренные при данной частоте.

Мощность потерь для постоянного тока:

$$P_a = \frac{U^2}{r_p} = UI, \quad (I.10)$$

где U – напряжение;

r_p - сопротивление.

Электрической прочностью, E_{np} называется средняя напряженность электрического поля, при которой происходит **электрический пробой** изоляционного промежутка. Напряжение, при котором происходит электрический пробой, называют «**пробивным напряжением**», U_{np} .

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad (I.11)$$

где h - толщина диэлектрика (изоляционный промежуток между электродами, разрядный промежуток).

Пробивное напряжение зависит от размера разрядного промежутка. При увеличении промежутка пробивное напряжение возрастает, а электрическая прочность снижается.

Электрическим пробоем диэлектрика называют скачкообразное увеличение электропроводности материала при воздействии высокого напряжения, вплоть до образования электропроводящего плазменного канала. Явление электрического пробоя в газах или жидкостях часто называют «электрическим разрядом», что говорит о разряде емкости через этот канал.

Механизмы развития разряда в газообразных, жидких и твёрдых диэлектриках различны

При электрическом пробое большого газового промежутка последовательно развиваются следующие явления:

I. Появление *свободного электрона* в газовом промежутке (случайного, из металлического электрода, в результате фотоионизации молекулы газа и т.п.)

II. Разгон свободного электрона электрическим полем до энергии, достаточной для того, чтобы при соударении с нейтральным атомом ионизировать последний (*ударная ионизация*).

III. Развитие *электронной лавины* как следствие множественных актов ударной ионизации.

IV. Рост *стримера* – проводящего плазменного канала, формирующегося из положительных ионов, оставшихся после прохождения лавины, и отрицательных зарядов, втягиваемых в положительную плазму.

V. Преобразование стримера в *лидер* за счет термоионизации, вызываемой прохождением емкостного тока по стримеру.

VI. *Главный разряд* происходит при замыкании каналом разряда разрядного промежутка.

При малых промежутках процесс пробоя может завершиться на стадиях III (лавиный пробой) и IV (стримерный пробой, искра).

Электрическая прочность газов зависит:

A) *от давления*. (При увеличении давления уменьшаются расстояния между молекулами. Разгоняющемуся электрону необходимо на более коротком пути разгона (называемого длиной свободного пробега) получить ту же энергию, достаточную для ионизации атома. Эта энергия определяется в первую очередь конечной (в момент соударения) скоростью электрона. Большее ускорения электрон может достичь за счет увеличения действующей на него силы – напряженности электрического поля. Экспериментальная зависимость пробивного напряжения газового промежутка от произведения давления «р» на величину промежутка «h» называется законом Пашёна. Минимальное значение пробивного напряжения для воздуха при $ph=0,7\text{Па}\times\text{м}$ составляет примерно 330 В. Левее указанного значения ph электрическая прочность возрастает из-за малой вероятности столкновения электронов с молекулами газа.); кривая Пашена представлена на рис. I.1

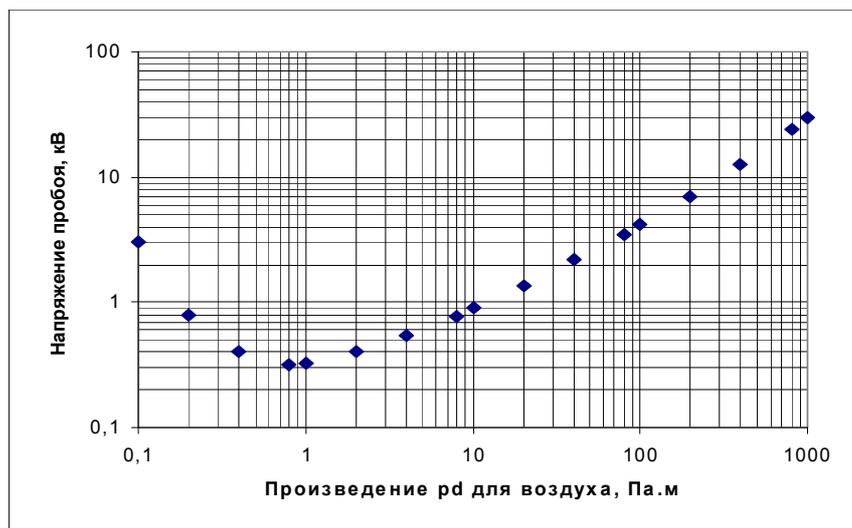


Рис I.1.Кривая Пашёна для лавинного пробоя воздушного промежутка

При $p \cdot h \sim 10$ Па·м и более можно пользоваться следующей приближенной формулой для расчета пробивного напряжения

$$U_{пр} = a_0 \frac{p \cdot h}{p_0} + b_0 \sqrt{\frac{p \cdot h}{p_0}} \quad (I.12)$$

где параметры a_0 и b_0 зависят от сорта газа:

Постоянные коэффициенты	Воздух	O ₂	N ₂	H ₂	Ar	He	Ne	SF ₆
a_0 , МВ/м	2,45	2,6	2,35	1,26	0,57	0,57	0,201	8,93
b_0 , МВ/м ^{1/2}	0,064	0,0635	0,0955	0,0437	0,226	0,0153	0,0157	0

Здесь предполагается давление $p_0 = 101,3$ кПа, температура $T_0 = 293$ К.

При изменении температуры и давления предыдущая формула слегка модифицируется

$$U_{пр} = a_0 \delta \cdot h + b_0 \sqrt{\delta \cdot h}, \quad (I.13)$$

где $\delta = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$

Б) От сродства молекулы газа к электрону, электроотрицательности газа. (Сродство к электрону – это способность некоторых нейтральных атомов и молекул присоединять добавочные электроны, превращаясь в отрицательные ионы. В электроотрицательных газах, состоящих из атомов с высоким

средством к электрону, требуется бóльшая энергия разгона электронов полем для образования электронной лавины).

Электрическая прочность жидкого диэлектрика не связана непосредственно с химическим строением жидкостей. Из-за близкого расположения молекул в жидком диэлектрике не реализуется механизм ударной ионизации.

На значение электрической прочности влияет в первую очередь количество газа в жидкости, состояние и площадь поверхности электродов

Электрический пробой жидкого диэлектрика начинается, как правило, с пробоя микроскопических газовых пузырьков. Из-за низкой диэлектрической проницаемости газа напряженность в пузырьке выше, чем в жидкости. А электрическая прочность газа – ниже.

Частичные разряды в пузырьках приводят к росту последних, что в итоге завершается пробоем жидкого диэлектрика.

Электрическая прочность жидкого диэлектрика повышается при:

- очистке от твердых проводящих микрочастиц (сажа, уголь и т.п.);
- сушке жидкости (удалении воды);
- дегазации жидкости (вакууммировании);
- повышении давления - P .

Для учета давления P и площади электродов S используется обобщение эмпирических зависимостей в виде формулы Мартина.

$$E_{\text{п}} = \frac{M \cdot P^{1/8}}{\tau^{1/3} \cdot S^{1/10}} \quad (\text{I.14})$$

где постоянная M зависит от сорта жидкости и имеет размерность МВ/см. В этом выражении длительность импульса τ следует подставлять в микросекундах, давление в атм., а площадь электродов S - в см². Постоянная M составляет 0,7 МВ/см для гексана и трансформаторного масла, 0,6 МВ/см для глицерина, 0,5 МВ/см для этилового спирта, 0,6 МВ/см для воды (в случае пробоя с катода) и 0,3 МВ/см (в случае пробоя с анода).

Механизмы **пробоя твердых диэлектриков** зависят от времени воздействия напряжения (с момента подачи до пробоя), определяющим физические процессы, происходящие при этом воздействии. Различают:

- электрический пробой (время воздействия – доли секунды);
- тепловой пробой (время воздействия от секунд до часов);
- пробой под действием частичных разрядов (время воздействия от нескольких часов до года и более).

При электрическом пробое твёрдого диэлектрика под действием приложенного напряжения разрываются химические связи, и вещество перерабатывается в плазму. Электрическая прочность твердого диэлектрика пропорциональна энергии химических связей.

Причиной теплового пробоя является разогрев диэлектрика, чаще всего за счет диэлектрических потерь, когда мощность потерь превышает мощность, отводимую от диэлектрика.

При повышении температуры увеличиваются электропроводность (за счет увеличения числа носителей) и угол диэлектрических потерь, что приводит к дополнительному росту энерговыделения, и снижению электрической прочности.

Частичным разрядом, ЧР называют разряд, проходящий в какой-либо ограниченной области изоляционного промежутка, и не замыкающий весь промежуток. Одним из примеров частичного разряда является коронный разряд в газах в неравномерном электрическом поле, когда стримером пробивается лишь область вблизи электрода с напряженностью поля выше электрической прочности газа (например, у провода высоковольтной линии электропередачи). В твердых телах ЧР – это локальный многолавиновый разряд в газовой поре диэлектрика.

Для возникновения частичного разряда в твердом диэлектрике необходимы два условия:

- наличие воздушного включения, напряженность поля в котором выше, чем в самом диэлектрике;

- напряжение, приложенное к диэлектрику, должно быть достаточным для того, чтобы напряженность поля в воздушном включении превысила пробивную.

При переменном поле, приложенном к диэлектрику, частичные разряды возникают на каждом полупериоде при достижении напряжением пробивного значения. Длительные периодические ЧР химически разрушают диэлектрик, увеличивают диэлектрические потери, что в конечном итоге приводит к пробое диэлектрика.

Для определения напряжённости поля, изоляции коаксиального кабеля можно использовать выражение:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (I.15)$$

где r – расстояние от оси кабеля до точки в изоляции, r_2 - радиус внешнего электрода, r_1 – радиус внутреннего электрода.

Примеры выполнения задания

1. Задание №1

При испытаниях изоляции провода его погружают в воду и подают на жилу напряжение. Найти напряжение, при котором должен был бы произойти электрический пробой изоляции из хлорированного полиэтилена, если изоляция толщиной 1 мм не имеет дефектов, а сечение жилы - 6 мм².

2. Определение величин, необходимых для выполнения задания.

При испытании кабеля в воде электрическое поле, воздействующее на изоляцию, имеет радиально-цилиндрическую конфигурацию. Пробой изоляции начнёт развиваться, если в изоляции на границе с жилой напряжённость электрического поля превысит электрическую прочность хлорированного полиэтилена. Напряжённость поля определяется по выражению:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Расстояние от оси кабеля до поверхности жилы $r = r_1 = \sqrt{S/\pi}$; до внешнего электрода (воды) $r_2 = \sqrt{S/\pi} + 1\text{мм}$. Для выполнения задания (вычисления напряжения U) необходимо знать электрическую прочность хлорированного полиэтилена.

Электрической прочностью, $E_{пр}$ называется средняя напряженность электрического поля, при которой происходит электрический пробой диэлектрика.

3. Описание материалов.

Хлорированный полиэтилен относится к органическим синтетическим карбоцепным полимерам группы полиолефинов [1, стр. 103-107]. Полиолефины, это полимеры, образующиеся при полимеризации олефинов. Полиэтилен получается в результате полимеризации этилена при высоком, среднем или низком давлениях. Хлорированный полиэтилен (ХПЭ) – это полиэтилен, модифицированный хлором. Введение хлора в макромолекулу полиэтилена приводит к снижению кристалличности, изменению температур размягчения, стеклования и др. Так при содержании 16-25% хлора ХПЭ – это термопласт, характеризующийся высоким относительным удлинением (до 1700%) и хорошей холодостойкостью. ХПЭ с 26-48% хлора – эластомер. ХПЭ с 49-60% хлора – кожеподобный продукт, а при дальнейшем увеличении содержания хлора – стеклообразный продукт.

Свойства полиэтилена высокой плотности, хлорированного в растворе (25% хлора):

№ п/п	Наименование параметра	обозначение	Значение параметра
1.	Удельное объёмное сопротивление	ρ_V	$10^{13}\text{Ом}\cdot\text{м}$
2.	Электрическая прочность	$E_{пр}$	30 МВ/м

3.	Диэлектрическая проницаемость при 1 кГц при 1 МГц	ε	6,1 4,3
4.	Тангенс угла диэлектрических потерь при 1 кГц при 1 МГц	$tg\delta$	0,019 0,134

Применяют ХПЭ эластомеры для изоляции проводов и кабелей.

4.Решение.

Радиус провода $r = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{6/\pi} = 1,38\text{мм}$; $D=2,38\text{мм}$; $E_{np} = 30 \text{ МВ/м}$.

$$U = E \cdot r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = 30\text{МВ/м} \cdot 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \ln \frac{2,38}{1,38} = 22,564\text{кВ}$$

5.Вывод.

Пробивное напряжение провода в изоляции из хлорированного полиэтилена превышает 22 кВ.

1. Задание № 2

Опишите новомикалекс и церезин. Определите, что может явиться причиной расплавления церезина в такой конструкции: Между двумя листами новомикалекса, каждый из которых имеет толщину 4 мм, находится слой церезина толщиной 2 мм. Конструкция имеет начальную температуру 60⁰С и к ней перпендикулярно слоям приложено переменное напряжение.

2. Определение величин, необходимых для выполнения задания.

Очевидно, что причиной расплавления церезина будут диэлектрические потери. Следует, однако, определить, что нагревается больше: новомикалекс или церезин. Представим, что к многослойной конструкции приложено напряжение U частотой ω . По отношению к каждому из диэлектриков это напряжение распределится в соответствии с системой уравнений:

$$\begin{cases} E_{нм} \cdot d_{нм} + E_{ц} \cdot d_{ц} = U \\ \frac{E_{нм}}{E_{ц}} = \frac{\varepsilon_{ц}}{\varepsilon_{нм}} \end{cases} .$$

Здесь $E_{нм}$ и $E_{ц}$, соответственно напряжённости поля в слоях новомикалекса и церезина; $d_{нм}$ - суммарная толщина двух пластин новомикалекса; $d_{ц}$ - толщина слоя церезина; $\varepsilon_{нм}$ и $\varepsilon_{ц}$ - диэлектрические проницаемости новомикалекса и церезина. Первое уравнение показывает, что приложенное напряжение представляет собой сумму падения напряжения в новомикалексе ($E_{нм} \cdot d_{нм}$) и падения напряжения в слое церезина ($E_{ц} \cdot d_{ц}$). Второе уравнение говорит о постоянстве потока электрического смещения в этих материалах при перпендикулярности силовых линий поверхности пластин ($D=E \cdot \varepsilon$).

Решая эту систему уравнений, находим напряжённости поля в каждом из материалов:

$$E_{нм} = \frac{U}{d_{нм} + d_{ц} \frac{\varepsilon_{нм}}{\varepsilon_{ц}}}; \dots \dots \dots E_{ц} = \frac{U}{d_{нм} \frac{\varepsilon_{ц}}{\varepsilon_{нм}} + d_{ц}} .$$

Удельные диэлектрические потери в каждом из материалов составят:

$$P_{нм,уд} = E_{нм}^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{нм} \cdot \operatorname{tg} \delta_{нм} ; \quad P_{ц,уд} = E_{ц}^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ц} \cdot \operatorname{tg} \delta_{ц} .$$

Найдем отношение удельных диэлектрических потерь:

$$\frac{P_{нм,уд}}{P_{ц,уд}} = \frac{\left(d_{нм} \frac{\varepsilon_{ц}}{\varepsilon_{нм}} + d_{ц} \right)^2}{\left(d_{нм} + d_{ц} \frac{\varepsilon_{нм}}{\varepsilon_{ц}} \right)^2} \cdot \frac{\varepsilon_{нм} \operatorname{tg} \delta_{нм}}{\varepsilon_{ц} \operatorname{tg} \delta_{ц}} .$$

Таким образом, для выполнения задания нам необходимо знать значения диэлектрических проницаемостей и тангенса угла диэлектрических потерь новомикалекса и церезина при 60°C .

Угол диэлектрических потерь, δ (дельта) - это угол, дополняющий до 90 градусов угол сдвига между током и напряжением в диэлектрике.

Диэлектрическая проницаемость, ϵ - это мера ослабления поля в веществе по сравнению с внешним полем; её значение показывает во сколько раз поле в веществе слабее поля от того же источника в вакууме. /1/.

3. Описание материалов.

Новомикалекс, равно как и микалекс относятся к материалам высокой нагревостойкости /2/. Это композиционные материалы, состоящие из стекла с нагревостойкими наполнителями /2/. У новомикалекса в качестве наполнителя применяется искусственная слюда – фторфлогопит. При его изготовлении могут быть использованы более тугоплавкие стёкла, что повышает нагревостойкость новомикалекса. Новомикалекс имеет длительную рабочую температуру 600⁰С. Электрические и механические показатели новомикалекса приведены в табл. 1. /2/.

Удельное объёмное сопротивление, ρ – это параметр вещества, численно равный измеренному в плоско-параллельном поле сопротивлению образца длиной 1 м с площадью поперечного сечения 1 м².

Электрическая прочность, $E_{пр}$ - это средняя напряженность электрического поля, при которой происходит электрический пробой

Электрическим пробоем диэлектрика называют скачкообразное увеличение электропроводности материала при воздействии определенного напряжения, вплоть до образования электропроводящего плазменного канала.

Предел прочности при изгибе $\sigma_{и}$, предельная сила, отнесённая к площади поперечного сечения образца и направленная параллельно сечению, после приложения которой изгиб образца проходит при снижении этой силы

Значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры показаны на рис. 1 /2/.

Таблица 1.

Электрические и механические показатели новомикалекса

Наименование показателя	Обозначение, e, размерность	Значения при температурах		
		20 ⁰ С	500 ⁰ С	600 ⁰ С
Удельное объёмное сопротивление	ρ_v , Ом·м	10 ¹¹ -10 ¹²	10 ¹⁰ (при 300 ⁰ С)	10 ⁶ -10 ⁷
Электрическая прочность	$E_{пр}$, МВ/м	30	14	6
Предел прочности при изгибе	$\sigma_{и}$, МПа	60-100	-	50-70

Рис.1. Температурные зависимости для новомикалекса
(1,3 – испытания в вакууме, 2,4 – испытания в воздухе)

Из приведённых температурных зависимостей можно определить, что при 60⁰ С у новомикалекса тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,05$, а диэлектрическая проницаемость $\epsilon=4$.

Угол диэлектрических потерь, δ - это угол, дополняющий до 90 градусов угол сдвига между током и напряжением в диэлектрике.

Значение **диэлектрической проницаемости вещества, ϵ** можно определить как отношение емкости конденсатора с данным веществом (диэлектриком) к емкости конденсатора тех же размеров, диэлектриком которого является вакуум /1/.

Церезин представляет собой смесь твёрдых углеводородов с эмпирической формулой от $C_{39}H_{80}$ до $C_{53}H_{108}$ /3/. Церезин полечают

кислотно-контактной очисткой парафинистой пробки, которая является осадком парафинистой нефти на стенках буровых скважин, на дне резервуаров. Церезин имеет хорошие диэлектрические свойства. Церезин применяют в кабельном производстве, а также для производства электроизоляционных восковых композиций. Известен также синтетический церезин – воскообразный диэлектрик светло-жёлтого цвета, кристаллической структуры, представляющий собой смесь твёрдых углеводородов метанового ряда. Основные свойства церезинов приведены в таблице 2. /3/

Таблица 2

Показатель	Природный церезин	Синтетический церезин
Температура каплепадания, °С	65-85	100
Глубина проникновения иглы при 25°С и нагрузке 0,98 Н, не более, мм	3	1
Кислотное число, мг КОН на 1 г. Церезина	0,1	0,02
Удельное объёмное сопротивление при 100°С, Ом·м, не менее	10 ¹⁰	10 ¹²
Тангенс угла диэлектрических потерь при 100°С и частоте 1000 Гц, не более	0,003	-

Кислотное число – количество щёлочи, необходимое для нейтрализации кислоты до рН=7.

Угол диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость церезина сильно зависят от температуры. Эти зависимости показаны на рис.

2

Рис. 2.

Из приведённых температурных зависимостей можно определить, что при 60°C у церезина тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,003$, а диэлектрическая проницаемость $\epsilon=2,1$.

4. Решение.

Подставляем необходимые данные в полученное в п.2 выражение:

$$\frac{P_{\text{нм,уд}}}{P_{\text{ц,уд}}} = \frac{\left(d_{\text{нм}} \frac{\epsilon_{\text{ц}}}{\epsilon_{\text{нм}}} + d_{\text{ц}} \right)^2}{\left(d_{\text{нм}} + d_{\text{ц}} \frac{\epsilon_{\text{нм}}}{\epsilon_{\text{ц}}} \right)^2} \cdot \frac{\epsilon_{\text{нм}} \text{tg}\delta_{\text{нм}}}{\epsilon_{\text{ц}} \text{tg}\delta_{\text{ц}}} = \frac{\left(4\text{мм} \frac{2,1}{4} + 2\text{мм} \right)^2}{\left(4\text{мм} + 2\text{мм} \frac{4}{2,1} \right)^2} \cdot \frac{4 \cdot 0,05}{2,1 \cdot 0,003} = 68,3$$

5. Вывод.

Удельные диэлектрические потери в новомикалексе в 68 раз выше, чем в церезине. Это связано в первую очередь с меньшими значениями диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь в церезине. Таким образом, церезин расплавится от нагрева главным образом новомикалекса.

1. Задание № 3

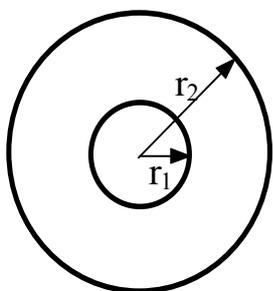
Опишите поликарбонатные пленки и воздух, как диэлектрики, и определите напряжённость поля в воздушном включении, которое находится в изоляции одножильного кабеля с номинальным напряжением 10 кВ. Напряжение на

жиле составляет 6 кВ. Жила диаметром 10 мм изолирована поликарбонатной пленкой "макрофоль" типа SN и имеет толщину изоляции 3 мм. При намотке пленки на жилу на поверхности жилы образовалось микроскопическое воздушное включение.

2. Определение величин, необходимых для выполнения задания.

Если пренебречь искажением поля, которое вносит небольшое воздушное включение, то напряжённость поля на поверхности провода, создающего радиально-цилиндрическое поле, равна:

$$E_n = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad /1/$$



Здесь r_1 и r_2 - соответственно радиусы жилы и оболочки, U - напряжение на жиле.

Напряжённость поля в воздушном включении по отношению к напряженности поля в изоляционной плёнке определяется обратным отношением диэлектрических проницаемостей материала воздуха ϵ_v и изоляции ϵ_n :

$$E_\epsilon = E_n \frac{\epsilon_n}{\epsilon_\epsilon} = \frac{\epsilon_n}{\epsilon_\epsilon} \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Из этого выражения видно, что для выполнения задания необходимо знать значения диэлектрических проницаемостей поликарбонатной пленки ϵ_n и воздуха ϵ_v .

Диэлектрической проницаемостью называется способность материала образовывать ёмкость /1, стр. 22/ и её можно определить как отношение

ёмкости конденсатора с данным диэлектриком к ёмкости конденсатора тех же размеров, диэлектриком которого является вакуум /2/.

3. Описание материалов.

Воздух /1/ - это смесь газов, состав которой (на уровне моря):

Компонент	% по объёму	% по весу
Азот N ₂	78,23	75,70
Кислород O ₂	20,81	23,00
Аргон Ar	0,90	1,24
Угольный ангидрид CO ₂	0,03	0,05
Прочие (H ₂ , Ne, He, Kr, Xe, NH ₃ , I, Rn)	0,03	0,01

Воздух является газообразным диэлектриком /1, стр. 43/. Его электрическая прочность при расстоянии между электродами в 1 см и атмосферном давлении равна примерно 3 МВ/м. Это на порядок меньше, чем у твердых диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость воздуха при 20⁰ С и давлении 101325 Па (760 мм рт.ст.) $\epsilon_v = 1,00059$ /1/. При повышении давления с 0,1 до 10 МПа диэлектрическая проницаемость воздуха увеличивается 1,00058 до 1,0549 /1/. Кроме того, диэлектрическая проницаемость воздуха увеличивается с повышением влажности из-за большой диэлектрической проницаемости водяных паров.

Поликарбонатная пленка (ПК) /3/ изготавливается толщиной 0,002 - 0,8 мм из поли-6-диоксидифенил-2,2-пропана без пластификаторов фирмой Bayer (ФРГ) под названием макрофоль. Плёнки бывают различных типов. Плёнки всех типов с одной стороны имеют шероховатую поверхность. Наилучшими электрическими и механическими свойствами обладают конденсаторные пленки KG и SKG. Эти свойства по данным /3/ следующие:

Показатель	Тип пленки		
	SN	KG	SKG
$E_{пр}$ при толщине 20 мкм, МВ/м	170	180	
ρ после выдержки при относительной влажности 80%, Ом×м	4×10^{14}	1×10^{13}	
ϵ в сухом состоянии при 50-1000 Гц	3,0	2,8	
$tg\delta$ в сухом состоянии при 50 Гц	0,0025	0.0025	

4. Решение.

Принимаем, что воздух в пузырьке находится при нормальном давлении.

Следовательно, $\epsilon_v = 1,00059$. Из п. 3 $\epsilon_n = 3,0$.

$$E_{\epsilon} = \frac{3,0}{1,00059} \frac{0,006 \text{ МВ}}{0,005 \text{ м} \ln \frac{8}{5}} = 7,655 \text{ МВ/м}$$

5. Вывод.

Напряжённость поля в воздушном пузырьке составит 7,655 МВ/м, что выше электрической прочности воздуха - 3 МВ/м. Это означает, что воздушный пузырёк будет пробиваться при напряжении на жиле выше, чем 3,8 кВ.

Задачи по разделу “ Электрическая прочность диэлектриков.

Диэлектрические потери.”

Задание I-01. Опишите свойства (физические, электрические), воздуха и элегаза, укажите особенности этих газов. Определите заряд шара радиусом 0,5 м, расположенного в воздухе при температуре 20° С и давлении 101325 Па. Потенциал шара равен 10^5 В. Каким станет потенциал этого шара, если его переместить в элегаз при той же температуре и давлении 3 МПа?

Задание I-02. Опишите воздух как электротехнический материал. Как влияет давление на электрические характеристики воздуха? Покажите это на следующем примере: В воздушный конденсатор, имеющий при атмосферном давлении ёмкость 200 пФ и заряд 2 нКл, закачивается воздух. Каким станет напряжение на обкладках этого конденсатора при изменении давления закачиваемого воздуха от атмосферного до 8 МПа?

Задание I-03. Опишите трансформаторное масло, его свойства и применение. Сравните электрические свойства трансформаторного масла и воздуха. Разберите следующий пример: В плоский конденсатор, заполненный трансформаторным маслом с площадью пластин $0,7 \text{ м}^2$ и расстоянием между электродами 1 см попал 1 л воздуха. На сколько и в какую сторону изменится ёмкость этой системы, если электроды расположены горизонтально?

Задание I-04. Опишите электрические, физические свойства и область применения таких материалов, как конденсаторное масло и совтол-10. Сравните их свойства на следующем примере: Во сколько раз изменится общая ёмкость двух конденсаторов при замене в них конденсаторного масла фенольной очистки на высший сорт совтола-10 при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$? Задачу решить при последовательном и параллельном соединении конденсаторов.

Задание I-05. Опишите кремнийорганическую жидкость, ПМС-50 (физические и электрические свойства, область применения). Разберите пример: Два коаксиальных цилиндра длиной 1 м и радиусами 0,11 м и 0,12 м опускаются в кремнийорганическую жидкость типа ПМС-50. Построить кривую изменения ёмкости этой системы в зависимости от глубины погружения цилиндров в жидкость.

Задание I-06. Опишите физические и электрические свойства полипропилена и рассчитайте, какую поверхность должен иметь плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами 0,5 мм и ёмкостью, равной ёмкости кабеля с полпропиленовой изоляцией и

следующими параметрами: длина кабеля 800 м, диаметр жилы 5 мм и диаметр оболочки - 8 мм, температура 20 °С, частота 50 Гц.

Задание I-07. Дайте технические названия поливинилфторида и полиметилметакрилата, опишите их физические и электрические свойства. Рассчитайте, во сколько раз изменится расстояние между пластинами плоского конденсатора при замене находящегося между ними поливинилфторида на полиметилметакрилат при условии сохранения ёмкости? Частота 50 Гц, температура 20 °С.

Задание I-08. Опишите физические, электрические свойства и область применения трансформаторного масла и определите значения заряда шарового электрода, погружаемого в масло при температурах 20° С и 90° С. Бак с трансформаторным маслом имеет большие размеры по сравнению с размерами электрода. У поверхности расположен шаровой электрод радиусом 0,25 м, полупогруженный в масло, диэлектрическая проницаемость которого имеет минимальное значение из возможных. К шару приложено напряжение 15 В. Ёмкостью половинки шара, находящейся в воздухе, по отношению к баку можно пренебречь.

Задание I-09. Опишите свойства и применение касторового масла. Разберите следующую ситуацию: В плоский конденсатор, заполненный касторовым маслом с площадью пластин 1 м² и расстоянием между электродами 1 см, попала вода в количестве 1 л. Электроды расположены вертикально. На сколько и в какую сторону изменится ёмкость этой системы при попадании в неё воды?

Задание I-10. Опишите свойства (физические, электрические) и область применения асбоцемента и полиэфирных компаундов. Разберите пример: С каких значений до каких изменится ёмкость между квадратными пластинами площадью 800 мм², прикладываемыми с обеих сторон к асбоцементной пластине толщиной 5 мм, если последнюю покрыть с обеих сторон полиэфирным компаундом КП-18 толщиной 1 мм. Для расчёта можно использовать минимальные значения параметров.

Задание I-11. Опишите свойства лакоткани марки ЛСК-5 и дистиллированной воды (физические, электрические), область применения. Используя найденные в справочнике минимальные значения необходимых величин, решите такую задачу: на стержень, диаметром 10 мм и длиной 60 см наматывается лакоткань ЛСК-5 толщиной 0,1 мм. Как изменится ёмкость между этим стержнем и соосным с ним цилиндром диаметром 4 см при погружении системы в дистиллированную воду, имеющую относительную диэлектрическую проницаемость 79?

Задание I-12. Опишите свойства (физические, электрические) и область применения электроизоляционных резин. Рассмотрите их на следующем примере: Металлический шарик диаметром 1 см полувдавливается в резиновый блок больших размеров из резины РШ-1 и к нему прикладывается напряжение 3 кВ. В каких пределах возможно изменение заряда шарика при температуре 20⁰ С и разных влажностях резины? При решении задачи не забудьте учесть ёмкость полушарика, находящегося в воздухе.

Задание I-13. Опишите свойства (физические, электрические) и область применения низкочастотной конденсаторной электрокерамик. Выберите марку низкочастотной керамики, для плоского конденсатора, работающего при частоте 0,50 МГц ?

Задание I-14. Опишите электроизоляционные неорганические плёнки. Разберите пример: Конденсатор выполнен из двух, приложенных друг к другу алюминиевых пластин, поверхность которых оксидированна. Как изменится ёмкость конденсатора, если алюминиевые пластины заменить титановыми с теми же размерами и той же толщиной оксидной пленки?

Задание I-15. Среди электроизоляционных полимеров разыщите и опишите полиакрилаты и полиметакрилаты. Сравните между собой их строение и свойства. Подберите такой тип полиакрилат, который, заменив полиметакрилат в устройстве, изменит ёмкость последнего не более чем на 9%.

Задача I-16. Опишите полистерол (технология получения, физические и электрические свойства, область применения). Ознакомьтесь с электрическими свойствами воздуха. сделайте расчет напряженностей электрического поля для случая: Провод изолирован полистеролом толщиной 1,8 мм, имеет диаметр 2,5 мм и находится под напряжением 380 В. На поверхности провода под слоем изоляции имеется небольшое плоское воздушное включение. Определите напряжённости электрического поля в этом включении и в слое твёрдой изоляции, прилегающем к проводу.

Задание I-17. Опишите трансформаторное масло и его свойства (физические, электрические, область применения). Сделайте расчеты для следующего примера: В баке с трансформаторным маслом у поверхности масла находится полусферовый электрод, к которому при температуре масла 20°C приложено напряжение 10 В. Как следует изменить напряжение на этом электроде с целью сохранения его заряда, если температура масла повысилась до 90°C ? При решении задачи ёмкостью полушара, находящегося в воздухе, можно пренебречь.

Задание I-18. Опишите свойства конденсаторного и касторового масел (физические и электрические), область их применения, и определите, во сколько раз может измениться ёмкость масляного изоляционного устройства, если в нем заменить касторовое масло на конденсаторное фенольной очистки (по ГОСТ 18102-72).

Задание I-19. В баке больших размеров налиты полиметилсилоксановая кремнийорганическая жидкость ПМС-50 и Хладон -112. Опишите физические и электрические свойства, область применения названных материалов. Воспроизведите расчетным путем следующий опыт: Погружаясь из одной жидкости в другую, в баке передвигаются два коаксиальных цилиндра радиусами 0,1 м и 0,08 м и длиной 0,6 м. Постройте кривую изменения ёмкости этой цилиндрической системы в зависимости от глубины погружения цилиндров в нижнюю жидкость. При расчетах принять

температуру жидкостей 20°C и минимальные справочные значения необходимых параметров.

Задание I-20. Опишите физические и электрические свойства пентона и воздуха. Сравните их на следующем примере: Одножильный кабель с изоляцией из пентона имеет длину 170 м, диаметр жилы 0,004 м и диаметр оболочки - 0,0065 м. Какую площадь поверхности должен иметь плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами 0,0035 м, имеющий равную с кабелем ёмкость?

Задание I-21. Дайте технические названия полисульфон и поливинилхлорида, опишите их физические и электрические свойства, область применения. Рассчитайте, во сколько раз изменится площадь пластин плоского конденсатора, работающего при частоте 50 Гц, при замене находящегося между ними полисульфона на поливинилхлорид той же толщины при условии сохранения ёмкости.

Задание I-22. Опишите поливинилхлорида изоляцию и шеллак. (физические и электрические свойства, область применения). Рассчитайте ёмкость изолированного провода следующей конструкции: Провод диаметром 3 мм покрыт полиимидной изоляцией толщиной 0,1 мм и затем слоем шеллака той же толщины, поверх которого находится медный экран. Рассчитать ёмкость между жилой этого провода и медным экраном при длине провода 100 м.

Задание I-23. Опишите свойства (физические, электрические, область применения) кремнийорганических лаков и оцените значение ёмкости между стержнем и обмоткой в следующей конструкции: Провод, покрытый эпоксидным лаком КО-915 с толщиной покрытия 0,1 мм, намотан плотно в 1 слой на металлический цилиндр диаметром 0,3 м и длиной 0,4 м.

Задание I-24. Опишите свойства асбоцемента и эпоксидного компаунда (физические, электрические) и их область применения. Определите верхнюю и нижнюю границы изменения ёмкости между пластинами площадью 1 м^2 ,

прикладываемыми к асбоцементной доске толщиной 8 мм, если на нее затем с обеих сторон нанесено эпоксидное покрытие КП-18 толщиной 1 мм?

Задание I-25. Опишите физические и электрические свойства, область применения лакоткани и определите диапазон значений ёмкости системы коаксиальных (соосных) цилиндров. Система коаксиальных цилиндров радиусами 0,02 м и 0,03 м и длиной 0,3 м находится в дистиллированной воде с диэлектрической проницаемостью 81. На внутренний цилиндр намотано 6 слоев лакоткани ЛШМ-105, имеющей толщину 0,12 мм.

Задание I-26. Опишите лаки на основе поливинилформалей (ПВФМ) и политрифторхлорэтилен (ПТФХЭ). Используя их свойства, рассчитайте толщину изоляции кабеля при следующих условиях: Жила одножильного кабеля, имеющая диаметр 2 мм, покрыта слоем лака на основе поливинилформали (ПВФМ) толщиной 0,1 мм, а затем изоляцией из политрифторхлорэтилена. Определите толщину ПТФХЭ - изоляции при условии равенства напряжённостей поля частотой 2000 Гц на поверхности изоляции и на границе раздела материалов изоляции.

Задание I-27. Опишите физические и электрические свойства, область применения стеатитовой и микролитовой керамики и определите, какую марку отечественной глиноземистой керамики следует использовать, чтобы максимально (вычислить, на сколько процентов) уменьшить длину системы коаксиальных цилиндров, не уменьшая их ёмкости, заменяя стеатитовую керамику на глиноземистую.

Задание I-28. Опишите электроизоляционные неорганические пленки, в том числе указанные в задании (способ получения, физические, электрические свойства, область применения) и определите, как изменится ёмкость конденсатора при следующих условиях: Конденсатор состоит из приложенных друг к другу алюминиевых пластин, поверхность которых окислена анодированием в плазме. Изоляционная пленка одной из пластин заменяется на пленку монооксида кремния той же толщины, нанесенную методом термического испарения.

Задание I-29. Опишите электрические свойства газообразных диэлектриков, в частности, элегаза. Выберите такое давление элегаза, чтобы ёмкость коаксиальной системы длиной 36,45 м, состоящей из трубы диаметром 0,6 м и находящегося в ней токопровода диаметром 6 см, равнялась бы 1 нФ. Опишите свойства этого газа.

Задание I-30. Опишите трансформаторное масло, и выберите масло такой марки, при заливке которого в трансформатор ёмкость обмотки последнего по отношению к корпусу была бы минимальной. Определите, во сколько раз увеличится ёмкость по сравнению с трансформатором без масла.

Задание I-31. Изучите кабельные масла. Выберите и опишите такие марки кабельного масла, которые используются для маслонеполненных кабелей среднего давления?

Задание I-32. Изучите хлорированные жидкие диэлектрики. Выберите среди этих жидких диэлектриков такой, чтобы при заполнении им конденсатора с площадью пластин $0,985 \text{ м}^2$ и расстоянии между ними 0,25 мм ёмкость конденсатора составила бы 1 мкФ при температуре 20°C . Приведите необходимые сведения об этом материале.

Задание I-33. Опишите текстолит и трансформаторное масло и определите, во сколько раз отличается напряжённость электрического поля в масле и в опущенной в него изоляционной перегородке из текстолита при частоте 50 Гц, если масло имеет марку ТКп, а тип текстолита – 171.

Задание I-34. Опишите нагревостойкие заливочные компаунды и рассчитайте, как соотносятся напряженности поля по концам стержня из компаунда типа ПК-11, если к этим концам приложено напряжение частотой 1 кГц, один из концов стержня находится при комнатной температуре, а другой нагрет до 600°C .

Задание I-35. Изучите поведение материалов в условиях ионизирующего излучения. Выберите и опишите пленку для изоляции конденсатора, работающего в условиях ионизирующего излучения. Пленка должна обеспечивать наибольшую ёмкость и неизменность этой ёмкости при

облучении электронами. Рассчитайте площадь пластин этого конденсатора при ёмкости 2 мкФ и толщине изоляции 0,1 мм.

Задание I-36. Опишите политрифторхлорэтилен и «сшитого» полиэтилена. Определите толщину наружной изоляции кабеля из этих материалов при условии равенства напряженностей поля частотой 50 Гц на поверхности изоляции и на границе раздела материалов изоляции при следующих условиях: Жила одножильного кабеля, имеющая диаметр 2 мм, покрыта слоем изоляции из «сшитого» полиэтилена толщиной 1 мм, затем на эту изоляцию нанесен слой политрифторхлорэтилен.

Задание I-37. Опишите политрифторхлорэтилен и электроизоляционные хладоны. Определите, во сколько раз отличается напряжённость электрического поля в хладоне-112 и в опущенной в него изолирующей перегородке из фторлона-3, полагая, что в диапазоне частот 60-100 Гц, диэлектрическая проницаемость этих материалов остается неизменной.

Задание I-38. Опишите нагревостойкие изоляционные материалы микалекс и стеклослюда. Рассчитайте, как соотносятся напряженности поля по концам проходного изолятора из стеклослюда, если один из концов стержня находится при комнатной температуре, а другой нагрет до 500° С.

Задание I-39. Изучите ударопрочные фенопласты. Выберите среди этого класса материалов и опишите такую пластмассу для изоляции электротехнического устройства, работающего в условиях облучения электронами, которая бы обеспечивала наибольшую ёмкость устройства и неизменность этой ёмкости при облучении электронами. Рассчитайте радиус полушара, вдавленного с поверхности в эту пластмассу, если его ёмкость - 25 пФ.

Задание I-40. Опишите полиэтилены и кремнийорганические каучуки. Определите толщину наружной изоляции одножильного кабеля при условии равенства напряженностей поля частотой 1 кГц на поверхности изоляции и на границе раздела материалов изоляции. Конструкция изоляции следующая: Жила кабеля, имеющая диаметр 2,5 мм, покрыта слоем изоляции из

хлорированного полиэтилена толщиной 2 мм, затем на эту изоляцию нанесен слой кремнийорганического каучука толщиной 1 мм.

Задание I-41. Изучите материалы, относящиеся к полиолефинам. Рассмотрите их свойства на таком примере: Жила одножильного кабеля, имеющая диаметр 4 мм, покрыта слоем изоляции из хлорсульфированного полиэтилена толщиной 1 мм, затем на эту изоляцию нанесен слой другого полиолефина толщиной 3,45 мм. Определите материал наружной изоляции при условии равенства напряженностей поля частотой 1 МГц на поверхности изоляции и на границе раздела материалов изоляции.

Задание I-42. Опишите неполярные полимерные пленки и рассчитайте, как соотносятся напряженности поля частотой 1 кГц в двухслойной изоляции конденсатора, если один слой выполнен из политетрафторэтилена, а другой - из полифениленоксида.

Задание I-43. Опишите поливинилхлорид и воздух. Используйте найденные параметры для решения следующей задачи: Провод покрыт поливинилхлоридной изоляцией толщиной 1 мм, имеет диаметр 2 мм и находится под напряжением 220 В. На поверхности провода, под изоляцией имеется воздушное включение. Определите напряженности электрического поля в этом включении и в твёрдой изоляции, прилегающей к проводу.

Задание I-44. Опишите характеристики полярных полимерных пленок. Используя найденные характеристики этих изоляционных сред, выполните расчет следующего случая: В конденсаторе с двухслойной изоляцией “воздух-пленка из полиэтилентерефталата” толщиной по 1 мм каждого слоя, пробивается и шунтируется электрической искрой воздух. Во сколько и в какую сторону изменяется ёмкость конденсатора при пробое воздушной прослойки, если температура нормальная?

Задание I-45. Опишите свойства и применение конденсаторного масла. Используя необходимые параметры масла, сделайте расчет следующего случая: В плоский конденсатор, заполненный конденсаторным маслом серно – кислой очистки, с площадью пластин $1,5 \text{ м}^2$ и зазором 2 см попала вода

($\epsilon=81$) в количестве 1 л. С какого значения до какого изменится ёмкость, если электроды расположены вертикально?

Задание I-46. Опишите физические, электрические свойства, область применения фенилона. Рассчитайте граничные значения ёмкости между проводом и металлическим экраном, если диаметр провода 1 мм и он изолирован от металлического экрана фенилоном толщиной 0,1 мм при длине конструкции 5 м.

Задание I-47. Опишите гексол и полиимидные пленки. Рассчитайте ёмкостной делитель напряжения при таких условиях: Ёмкостный делитель в верхнем плече имеет изоляцию из гексола, а в нижнем из электроизоляционной полиимидной пленки. Как изменится отношение емкостей верхнего и нижнего плечей при повышении температуры с 20° до 90° С. Зависимостью диэлектрической проницаемости от частоты в диапазоне 1Гц...1кГц пренебречь.

Задание I-48. Опишите физические и электрические свойства, область применения электроизоляционных резин. Рассчитайте для нормальных условий ёмкость между шарами, вдавливаемыми в большой блок резины на значительном расстоянии друг от друга. Два шарика диаметром 2 см вдавливаются в резину до половины. При расчётах следует учесть и те половинки, которые находятся в воздухе.

Задание I-49. Опишите эпоксидные компаунды, в том числе их свойства при криогенных температурах. Рассчитайте, как соотносятся напряженности поля по концам проходного изолятора из компаунда ЭКБ, если они находятся под напряжением частотой 100 Гц. Один из концов стержня находится при температуре 20° С, а другой охлажден до криогенной температуры 77° К.

Задание I-50. Опишите воздух как электроизоляционный материал. Рассмотрите такой пример: Между двух концентрических сфер с радиусами 1 м и 1,1 м находится воздух при давлении 10 МПа. К сферам подведено постоянное напряжение 30 В. Определите, с какого значения до какого

изменится заряд этого сферического конденсатора, если давление в нем уравнивается с атмосферным.

Задание I-51. Опишите характеристики электроизоляционных неорганических пленок и решите следующую задачу: В конденсаторе с двухслойной изоляцией “воздух-пленка нитрида бора, толщиной по 0,5 мм каждого слоя, пробивается и шунтируется электрической искрой воздух. Как при этом изменяется ёмкость конденсатора?

Задание I-52. Опишите свойства и применение полибутенов. Сделайте расчеты для примера: В плоский конденсатор, заполненный октолом с площадью пластин 1 м^2 и зазором 2 см попал воздух количестве 1 л. На сколько и в какую сторону изменится ёмкость, если электроды расположены горизонтально.

Задание I-53. Опишите физические и электрические свойства эпоксидных лаков, область их применения. Используя найденные данные, сделайте расчет следующего изделия: Провод, покрытый кремнийорганическим лаком ЭП-96 с толщиной покрытия 0,01 мм, намотан плотно в 1 слой на металлический стержень длиной 1 м и диаметром 12 мм. Определите значение ёмкости между стержнем и обмоткой.

Задание I-54. Опишите трихлордифенил высшего сорта и полиимидные плёнки. Рассчитайте ёмкостной делитель напряжения, выполненный с применением этих материалов. Ёмкостной делитель напряжения имеет изоляцию верхнего плеча из трихлордифенил, а нижнего из полиимидной пленки. Соотношение ёмкостей верхнего и нижнего плечей при 90° С составляет 1:1000. Как изменится это соотношение, если температура нижнего плеча понизится до 20° С ?

Задание I-55. Опишите физические и электрические свойства, область применения электротехнического фарфора и форстеритовой керамики. Определите, во сколько раз (максимально) можно уменьшить длину системы коаксиальных цилиндров, не уменьшая их ёмкости, если заменить,

находящийся между цилиндрами электротехнический фарфор группы 100 на форстеритовой керамику?

Задание I-56. Изучите электроизоляционные полимерные плёнки. Рассчитайте конденсатор, выполненный с их применением. Конденсатор выполнен с применением полистирольной пленки ППС – А первого сорта. Определите, во сколько раз (минимально) изменится ёмкость конденсатора, если использовать политетрафторэтиленовую пленку КО.

Задание I-57. Изучите конденсаторные керамические материалы. Выберите из справочника и опишите такой конденсаторный керамический материал, с помощью которого можно было бы создать цилиндрический конденсатор с ёмкостью не менее 1,64 нФ при частоте 0,5-5 МГц. Коаксиальные цилиндрические электроды конденсатора имеют радиусы 0,2 и 0,5 см и длину 0,1 м.

Задание I-58. Соберите сведения по жидким диэлектрикам на основе фторорганических соединений. Выберите марку и опишите жидкий диэлектрик этого класса, при заливке которого в трансформатор ёмкость обмотки последнего по отношению к корпусу была бы минимальной. Определите, во сколько раз увеличится ёмкость по сравнению с трансформатором без этого жидкого диэлектрика?

Задание I-59. Рассмотрите справочные данные по электроизоляционным полимерным плёнкам. Выберите и опишите такую электроизоляционную полимерную пленку (и способ ее получения), при которой можно получить максимальную ёмкость устройства, использующего эту пленку для изоляции между электродами. Во сколько раз ёмкость устройства уменьшится, если вместо пленки использовать воздушную изоляцию?

Задание I-60. Опишите конденсаторное масло и конденсаторную бумагу. Рассчитайте возможные длины электродной фольги, ширина которой равна 10 см, если изоляцией между электродами конденсатора с ёмкостью 1 мкФ служит конденсаторная бумага типа МКОН (марки 2), пропитанная конденсаторным маслом фенольной очистки. Изоляция состоит из 10-и слоёв

бумаги толщиной 12 мкм, спрессованной с коэффициентом запрессовки $K=1,2$. При расчетах учесть изменение диэлектрической проницаемости клетчатки бумаги в результате её пропитки маслом. Плотность клетчатки принять равной 1240 кг/м^3 .

Задание I-61 Конденсатор зарядился при напряжении 220В до $5,53 \cdot 10^{-9}$ Кл, после замены диэлектрика конденсатор зарядился до $55,312 \cdot 10^{-9}$ Кл. Определить материалы диэлектриков, если емкость конденсатора с вакуумом равна 22,125мФ.

Задание I-62 Определите ток через стержень диаметром 12мм, длиной 30мм и потери мощности в нем, если он изготовлен из эбонита и зажат между электродами с напряжением 380В при постоянном и переменном напряжении.

Задание I-63 Постройте кривую изменения диэлектрической проницаемости азота при повышении температуры до 400°C при давлении 760мм рт. ст.

Задание I-64 Определите диэлектрическую проницаемость сложного диэлектрика, представляющего механическую смесь двух компонентов с разными диэлектрическими проницаемостями. Материалы – полиэтилен-полихлорвинил. Объем изменяется в долях от 0 до 1.

Задание I-65 Определите установившийся ток через кубик из оргстекла с ребром $a=30 \cdot 10^{-3}$. Рассчитайте диэлектрические потери при постоянном напряжении $U=2,500\text{В}$ с учетом поверхностного сопротивления.

Задание I-66 Двухслойный диэлектрик включен на переменном напряжении $U_1=500\text{В}$, на втором $U_3=1000\text{В}$. Толщина слоев равна соответственно $h_1=2\text{мм}$, $h_2=1\text{мм}$. Определите относительную диэлектрическую проницаемость первого слоя, если $\zeta_r=5$ и диэлектрическую проницаемость смеси двух компонентов.

Задание I-67 При напряжении $U=2 \text{ кВ}$ с частотой 100Гц, слои материалов имеют толщину $d_1=0,2\text{мм}$, $d_2=0,7\text{мм}$. Определить напряжение на слоях и напряженность поля в них, а также диэлектрическую проницаемость смеси этих двух компонентов (полистирол-флогопит).

Задание I-68 Определить форму электродов, между которыми произошел пробой, если расстояние между ними 4мм, напряжение пробоя 4кВ, поправочный коэффициент $a=1,002$. Данные опыта пробоя:

Шар-Шар $E_{пр}=2,004$

Игла-Плоскость $E_{пр}=1,002$

Плоскость-Игла $E_{пр}=0,7675$

Плоскость-Плоскость $E_{пр}=1,503$.

Задание I-69 Радиочастотный кабель длиной 5м с диаметром внутреннего провода d_1 , имеет сплошную изоляцию из полиэтилена, внешний диаметр провода d_2 . Определить диэлектрические потери при $t = 40^{\circ}C$.

Задание I-70 Постройте кривую изменения диэлектрических потерь при $t = 70^{\circ}C$ с ростом частоты для кабеля длиной 10м с диаметром провода $d=0,5$ см, изоляция из полиэтилена с внешним диаметром $d=1,5$ см.

Задание I-71 Определить сопротивление изоляции конденсатора, если через время $t=20$ сек. после отключения его от источника питания разность потенциалов на обкладках уменьшилась на 30%. Емкость конденсатора равна 2мкФ.

Задание I-72 Цилиндрический стержень диаметром 10мм и длиной 20мм, изготовленный из полистирола, зажат двумя металлическими электродами, между которыми поддерживается напряжение постоянного тока 500В. Определить ток через стержень и потери мощности в нем.

Задание I-73 Конденсатор зарядился при напряжении 250В до $5,53 \cdot 10^{-9}$ Кл, после замены диэлектрика конденсатор зарядился до $12,268 \cdot 10^{-9}$ Кл. Определить материалы диэлектриков, если емкость этого конденсатора с вакуумом равна 22,125мФ.

Задание I-74 К воздушному конденсатору, заряженному до напряжения 220В, подсоединили параллельно конденсатор таких же размеров, но с диэлектриком из стекла. Конденсаторы разрядились до 30В. Определить их емкость и время разряда.

Задание I-76 Расстояние между пластинками воздушного конденсатора $d=3\text{мм}$. Определить напряжение, при котором может быть пробит этот воздушный промежуток.

Задание I-77 Определить напряжение, при котором будет пробит образец:

1. из стекла толщиной 0.2 см;
2. из фарфора толщиной 0.1 см;
3. из электроизоляционного картона толщиной 1.5 мм.

Задание I-78 Образец резины толщиной 5мм пробивается при напряжении $U=8.5\text{ кВ}$. Определить электрическую прочность этого материала.

Задание I-79 Определить толщину слоя электротехнического картона между пластинами плоского конденсатора, рассчитанного на номинальное напряжение $U_{\text{ном}}=1000\text{ В}$. Запас прочности двукратный (2кВ).

Задание I-80. Опишите нагревостойкие изоляционные материалы микафолей и стеклослюда. Рассчитайте, как соотносятся напряженности поля по концам проходного изолятора из стеклослюда, если один из концов стержня находится при комнатной температуре, а другой нагрет до 450°C .

II Раздел «Электропроводность. Проводниковые, полупроводящие и изоляционные материалы»

Удельное электрическое сопротивление, ρ – это параметр вещества, численно равный сопротивлению образца длиной 1 м с площадью поперечного сечения 1 м^2 , измеренному в плоско-параллельном поле.

Удельное электрическое сопротивление измеряется в $[\text{Ом}\frac{\text{м}^2}{\text{м}}]$ или в $[\text{Ом}\times\text{м}]$. Удельная электрическая проводимость измеряется в $[\text{См}/\text{м}]$.

По значению удельного электрического сопротивления все вещества подразделяются на 3 класса:

Проводники..... $\rho \approx 10^{-8}\dots 10^{-6}\text{ Ом}\times\text{м}$;

Слабопроводящие материалы (полупроводники)... $\rho \approx 10^{-6} \dots 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

Диэлектрики (изоляционные материалы)..... $\rho \approx 10^6 \dots 10^{20} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Удельное сопротивление:

$$\rho = \frac{RS}{l}, \quad (\text{II.1})$$

Сопротивление проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (\text{II.2})$$

где ρ – удельное сопротивление провода, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

R – сопротивление провода, Ом ;

l – длина провода, м ;

S – сечение провода, м^2 .

Изменение сопротивления под действием температуры:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_\rho (T_2 - T_1)], \quad (\text{II.3})$$

где α_ρ – температурный коэффициент удельного сопротивления, К^{-1}

ρ_1, ρ_2 – удельное сопротивление провода, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

T_1, T_2 - температуры горячего и холодного спаев, К .

Термо-эдс, В:

$$U = \psi (T_1 - T_2), \quad (\text{II.4})$$

где T_1, T_2 – начальная и конечная температуры, К ;

ψ – коэффициент термо-эдс, $\frac{\text{В}}{\text{К}}$.

Коэффициент тензочувствительности:

$$d = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (\text{II.5})$$

где R – сопротивление образца;

ΔR – изменение сопротивления образца;

l – длина образца;

Δl – изменение длины образца.

Электропроводность – это способность вещества проводить электрический ток, обусловленная наличием свободных зарядов в веществе. Для численного определения этой способности вводятся величины: «удельное электрическое сопротивление», ρ и «удельная электрическая проводимость», γ . Эти величины являются обратными по отношению друг к другу:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{II.6})$$

Значение удельной электрической проводимости вещества – γ [См/м] определяется как произведение суммарного заряда свободных носителей в единице объема nq [Кл/м³] и подвижности этих зарядов – u [м²/с×В]:

$$\gamma = nq \times u \quad (\text{II.7})$$

n – концентрация свободных зарядов, [1/м³], q – заряд носителя, [Кл].

В электропроводном материале вместо электростатического поля электрических зарядов существует электрическое поле тока, протекающего по материалу. Виды полей, встречающихся в задачах раздела 2 те же, что и в разделе 1. Но для электропроводного материала формулы будут выглядеть следующим образом:

Для плоско-параллельного поля, проводимость конструкции, имеющей площадь поперечного сечения S и длину d , будет равна:

$$G = \gamma \frac{S}{d}, \quad (\text{II.8})$$

где

γ - удельная электропроводность материала.

Для радиально цилиндрического поля, сохраняя те же, что в разделе 1 обозначения геометрических размеров, напишем выражение для проводимости между двумя коаксиальными цилиндрами:

$$G = \gamma \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (\text{II.9})$$

из которого также несложно получить выражение для сопротивления:

$$R = \rho \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l} \quad (\text{II.10})$$

В радиально-сферическом поле потенциал шара, с которого стекает ток в "бесконечность", будет выражаться как:

$$\phi = \frac{I}{\gamma 4\pi r}, \quad (\text{II.11})$$

где I - ток, стекающий с шарового электрода радиуса r .

Проводимость между двумя концентрическими (имеющими общий центр) сферами радиусов r_1 и r_2 :

$$G = 4\pi\gamma \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}, \quad (\text{II.12})$$

. Если независимо от вида поля геометрические параметры выражений обозначить буквой Γ , то будем иметь два аналогичных выражения:

Для электростатического поля

в диэлектрике:

$$C = \epsilon_0 \epsilon \Gamma$$

Для поля электрического тока

в проводнике:

$$G = \gamma \Gamma \quad (\text{II.13})$$

Если материал конструкции между электродами имеет большое удельное сопротивление и определенное значение диэлектрической

проницаемости, то для такой конструкции справедливо вытекающее из (2.7) выражение:

$$CR = \varepsilon_0 \varepsilon \rho \quad (\text{II.14})$$

Левая часть этого выражения есть постоянная времени разряда конденсатора с ёмкостью C через сопротивление R . Правая часть называется постоянной времени релаксации:

$$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon \rho \quad (\text{II.15})$$

Время релаксации отражает скорость затухания возбуждения в материале после исчезновения электрического поля, вызвавшего это возбуждение.

В некоторых заданиях раздела затрагивается тема создания композиционных материалов, электропроводность и диэлектрическая проницаемость которых определяются соотношением не реагирующих между собой компонентов с различными значениями указанных величин.

Композиционным материалом называется материал, состоящий из двух или более компонентов, химически не связанных между собой, но в итоге изменяющих параметры материала в целом по сравнению с параметрами каждого из компонентов.

Примеры: бетон, текстолит, гетинакс, эком, бетэл, вилит, резина, стеклопластик, некоторые материалы для электрических контактов, магнитодиэлектрики и др.

Если смешивать два вещества с разными значениями σ , то возможно образование двух структур: “матричная система” и “статистическая смесь”.

В *матричной системе* один из материалов образует непрерывную матрицу, в которую вкраплены включения другого материала. Значение обобщенной проводимости для матричной смеси определяется выражением:

$$\sigma_{\text{экс}} = \sigma_0 \left(1 + \frac{V_1}{\frac{1-V_1}{3} + \frac{\sigma_0}{\sigma_1 - \sigma_0}} \right), \quad (\text{II.16})$$

в котором σ_0 и σ_1 - обобщенные проводимости матричной фазы и наполнителя, v_1 - объемная доля наполнителя (в долях единицы).

В статистической смеси оба материала равноправны, и значение обобщенной проводимости рассчитывается по выражению:

$$\sigma_{\text{экс}} = A + \sqrt{A^2 + \frac{\sigma_1 \sigma_2}{2}} \quad (\text{II.17})$$

где

$$A = \frac{(3v_1 - 1) \cdot \sigma_1 + (3v_2 - 1) \cdot \sigma_2}{4} \quad (\text{II.18})$$

Пример решения задач

1.Задание

Опишите свойства электроизоляционных кабельных резин. Проверьте, сработает ли устройство защитного отключения (УЗО) при следующих условиях: Шахтный одножильный кабель диаметром 12 мм длиной 500 м, сечением жилы 35 мм², с изоляцией из резины типа РТИ-1 попал в воду. Напряжение на жиле – 380 В. УЗО срабатывает, если утечка через изоляцию превысит 10 мА.

2. Определение величин, необходимых для выполнения задания.

Для того, чтобы сработало УЗО необходимо, чтобы сопротивление изоляции провода было бы не более такого, при котором ток утечки был бы равен 10 мА. Найдём это сопротивление:

$$R_{\text{из.}} \leq 380 \text{ В} / 0,01 \text{ А} = 38000 \text{ Ом.}$$

Поскольку ток через изоляцию стекает с жилы, поле тока можно принять радиально-цилиндрическим, и сопротивление изоляции будет равно:

$$R_{\text{из}} = \rho_{\text{резины}} \frac{\ln r_2 / r_1}{2\pi l} .$$

Неизвестным параметром в этом выражении является удельное сопротивление резины – $\rho_{\text{резины}}$.

Удельное электрическое сопротивление, ρ – это параметр вещества, численно равный сопротивлению образца длиной 1 м с площадью поперечного сечения 1 м², измеренному в плоско-параллельном поле.

Можно предположить, что при увлажнении удельное сопротивление изоляции снижается. Если оно снизится таким образом, что сопротивление изоляции в целом станет ниже 38 кОм, то должно сработать УЗО.

Критическое значение удельного электрического сопротивления резины:

$$\rho_{\text{резины}} = \frac{2\pi l \times 380000}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

3. Описание материалов.

Резина представляет собой вулканизированную многокомпонентную смесь на основе каучуков /1/. Резиновая смесь изготавливается путём введения в каучук минеральных или углеродных порошкообразных наполнителей (мел, тальк, каолин, техуглерод), вулканизирующих агентов и др.

Каучуки бывают натуральные и синтетические. Натуральный каучук является естественным продуктом коагуляции частиц, содержащийся в соке, который извлекают из стволов каучуковых деревьев, растущих в странах с тропическим климатом. Синтетические каучуки являются продуктом полимеризации (вулканизации) смесей разнообразных химических веществ: изопрена, бутадиена, стирола, изобутилена, этилена, пропилена, хлоропрена и др.

Резины типа РТИ относятся к кабельным изоляционным резинам, то есть применяются при изготовлении кабелей наряду с изоляционно-защитными резинами, резинами для защитных оболочек и электропроводящими резинами. Для изоляции, допускающей длительный нагрев токопроводящей жилы до 65 °С, применяются резины на основе каучуков общего назначения типов РТИ-0, РТИ-1, РНИ, а также изоляционно-защитные резины типов РТИШ и РТИШМ. Наиболее широко для изолирования кабелей, проводов и шнуров применяют резины типа

РТИ-1. Они отвечают эксплуатационным требованиям всех кабельных изделий на переменное напряжение до 660 В и постоянное до 1000 В.

Прочность при растяжении резины РТИ-1 составляет 5,88 МПа, а относительное удлинение при разрыве не менее 350 % /1/.

Электрические характеристики резин типа РТИ-1 в зависимости от времени увлажнения показаны в таблице 1.

В таблице помимо удельного электрического сопротивления приводятся также значения тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), диэлектрической проницаемости (ϵ) и электрической прочности ($E_{\text{пр}}$).

Таблица 1 /1/

Время увлажнения, сут	Увлажнение при 20 °С				Увлажнение при 70 °С			
	ρ , Ом·м	$\text{tg}\delta$	ϵ	$E_{\text{пр}}$, МВ/м	ρ , Ом·м	$\text{tg}\delta$	ϵ	$E_{\text{пр}}$, МВ/м
0	$2,4 \cdot 10^{13}$	0,021	3,4	41,9	$2,4 \cdot 10^{13}$	0,021	3,6	41,9
1	$8,0 \cdot 10^{12}$	0,022	3,8	37,5	$3,9 \cdot 10^{12}$	0,013	4,2	13,9
4	$1,3 \cdot 10^{12}$	0,026	3,9	17,9	$3,9 \cdot 10^{12}$	0,012	4,3	9,8
7	$1,2 \cdot 10^{12}$	0,026	3,8	15,1	$3,9 \cdot 10^{12}$	0,012	4,6	8,0
14	$1,1 \cdot 10^{12}$	0,027	3,8	14,1	$3,6 \cdot 10^{12}$	0,015	4,6	6,0

4. Решение.

Рассчитаем удельное электрическое сопротивление электрической изоляции из резины РТИ-1, при котором может сработать УЗО. Для этого вначале определим радиус токопроводящей жилы через площадь её сечения - S:

$$r_1 = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{35}{3,14}} = 3,34 \text{ мм}.$$

Радиус внешней эквипотенциальной поверхности коаксиальной системы можно принять равным 6 мм, поскольку кабель находится в воде, а его диаметр равен 12 мм. Рассчитываем удельное электрическое сопротивление:

$$\rho_{\text{резины}} = \frac{2\pi \times 380000}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 38000}{\ln \frac{6}{3,34}} = 2,04 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Таким образом, УЗО может сработать, если удельное сопротивление в результате увлажнения снизится до $2 \cdot 10^8$ Ом·м.

5. Вывод.

Сравнивая полученное значение со значениями в таблице п. 3, видим, что удельное сопротивление резины РТИ-1 даже после 14-и дней увлажнения при любой температуре имеет значения на 4 порядка выше, чем полученное в нашем расчёте. Таким образом, при попадании резинового кабеля в воду срабатывания УЗО не произойдёт. То есть условия электробезопасности при эксплуатации резинового кабеля в воде соблюдаются. По-видимому, отключение УЗО может произойти, если в изоляции будут дополнительные повреждения, например, трещины от старения.

Задачи по разделу «Электропроводность. Проводниковые, полупроводящие и изоляционные материалы»

Задание II-01. Опишите свойства меди и области её применения. Используя эти свойства, решите задачу: В точку на поверхности расплавленной меди вводится ток силой 12 кА. Если измерять разность потенциалов между точками радиально отстоящими от места ввода тока на расстоянии 8 и 18 см, что покажет прибор?

Задание II -02. Опишите алюминий (физические, электрические свойства, область применения). Решите задачу: Между двумя коаксиальными кольцами наливается расплавленный алюминий. Как нужно изменить толщину слоя

застывшего алюминия, чтобы сопротивление между кольцами не изменилось?

Задание II -03. Опишите медь и алюминий как электропроводящие материалы и укажите, как влияют добавки на электрические характеристики материалов. Покажите это на следующем примере: Одна проволока сделана из алюминия с добавлением 0,25% меди. Другая - из чистого алюминия. Во сколько раз сечение одной проволоки больше другой, если их сопротивление и длина одинаковы?

Задание II -04. Опишите поликристаллический графит - свойства (физические, электрические), область применения. Выполните расчет: К концам двух коаксиальных цилиндров из поликристаллического графита с наружными диаметрами 2,5 см и 5 см, толщиной стенки 5 мм и длиной 10 см приложено напряжение 10 В. Определить токи в том и другом цилиндре.

Задание II -05. Опишите физические и электрические свойства контактных композиционных материалов и область их применения. Рассчитайте сопротивление контакта в следующем примере: При замыкании контактов, выполненных из контактной композиции КН-3, они коснулись друг друга лишь площадками диаметром 0,2 мм.

Задание II -06. Опишите электроизоляционные неорганические плёнки. Разберите следующий пример: Электролитический конденсатор, анодом которого служит алюминиевая фольга, изолированная от второго электрода оксидной пленкой, имеет емкость 3 мкФ. Какой должна быть технология нанесения оксидной пленки, чтобы получить наибольшее сопротивление изоляции конденсатора? Укажите значение этого сопротивления.

Задание II -07. Опишите физические и электрические свойства меди и припоя ПОС-90, области применения. Решите с использованием найденных параметров задачу: Медный провод сечением 3 мм² запаивается припоем ПОС-90 в цилиндрическую втулку с внутренним диаметром 4 мм на длину 7 мм. Найти сопротивление контакта.

Задание II -08. Опишите физические и электрические свойства контактных композиционных материалов и область их применения. Определите марку контактной композиции в следующем примере: Композиционный материал для сильноточных контактов состоит из алюминиевой матрицы (97% по массе) и углеродистого наполнителя (поликристаллический графит, 3% по массе). Сравните расчетное значение удельного сопротивления этой композиции со справочным.

Задание II -09. Опишите электрические свойства растворов соляной кислоты и латунь, как электропроводящий материал. Сравните эти свойства, используя следующий пример: Полиэтиленовая труба с внутренним диаметром 0,5 м, заполненная 15% соляной кислотой, служит проводником электрического тока. Определите сечение проводника из латуни марки Л60, эквивалентное названному электролитическому проводнику.

Задание II -10. Опишите физические и электрические свойства 20% раствора поваренной соли. Какую разность потенциалов следует приложить к двум полушаровым электродам диаметром 3 мм, погруженным с поверхности 10% раствор поваренной соли на значительном расстоянии от стенок сосуда и друг от друга, чтобы между этими электродами потек ток силой 2 А?

Задание II -11. Опишите физические и электрические свойства, область применения проволоки из сплава Х13Ю4. Определите массу этой проволоки диаметром 0,6 мм, необходимую для создания резистора с сопротивлением 4,5 кОм, работающем при оптимальной для этой марки температуре.

Задание II -12. Разрабатывается новый электротехнический материал, путём смешивания измельченной слюды (мусковит) с полиуретаном. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанных материалов. Предскажите значения удельного сопротивления нового материала при содержании в нём слюды (с минимальным удельным сопротивлением) 30% и 60% по объему.

Задание II -13. Опишите высоконагревостойкое стеклоэмалевое покрытие для провода марки ПЭЖБ и оцените сопротивление изоляции этого провода в нормальном состоянии и после выдержки в 100% влажности в течение 250 часов. Диаметр провода - 0,5 мм, толщина изоляции - 30 мкм, а длина провода - 50 м.

Задание II -14. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихрома и стали. Пользуясь найденными параметрами, оцените как отличаются длины проволок из нихрома марки Х20Н80 и стали марки НЖ, если у этих проволок одинаковое сечение и сопротивление.

Задание II -15. Опишите алюминий как материал для проводов линий электропередачи. Пользуясь найденными параметрами решите задачу: Электрический ток передается через землю с удельным сопротивлением 40 Ом·м на расстояние 65 км при помощи 2-х полушаровых электродов радиусом 1 м, вдавленных с поверхности в грунт по обоим концам электропередачи. Обратно ток возвращается по алюминиевому проводу. Какое сечение провода соответствует условию равенства сопротивлений указанных путей тока?

Задание II -16. Опишите физические, электрические свойства и область применения стального (марка “сталь 10”), алюминиевого и медного проводов и определите соотношение их сечений при одинаковых сопротивлении и длине.

Задание II -17. Опишите алюминий и сталь как материалы для проводов линий электропередачи. Пользуясь найденными параметрами решите следующую задачу: Провод линии электропередачи марки АС 120/19 имеет стальной сердечник из 7-ми стальных проволок диаметром 1,85 мм (марка стали НЖ и навив из 26 алюминиевых проволок диаметром 2,7 мм). Каково соотношение значений постоянного тока текущего по стали и алюминию?

Задание II -18. В точку на поверхности расплавленной меди вводится ток, растекающийся в расплаве. На расстояниях 10 и 20 см от точки ввода тока измеряется разность потенциалов, составляющая 300 мкВ. Опишите

физические и электрические свойства меди, область применения и определите, какой ток вводится в расплав?

Задание II -19. Полагая, что структура контактного композиционного материала для высокоточных контактов марки КМК-Б45 является статистической смесью, рассчитайте ожидаемое значение удельного сопротивления этого материала, описав предварительно входящие в него компоненты и необходимые для расчета параметры. Компонентом с малым процентным содержанием можно пренебречь. Учтите, что в справочнике содержание компонентов указано в долях массы.

Задание II -20. Опишите физические и электрические свойства, область применения молибдена и вольфрама. Определите, во сколько раз как отличается сечение отожженных проволок из вольфрама и молибдена, если у них одинаковое сопротивление и вес?

Задание II -21. Опишите влияние добавок на удельное сопротивление меди и алюминия. Рассчитайте сопротивление постоянному току катушки из медной проволоки в случае, если в меди содержится 0,08 % железа. Диаметр проволоки 0,8 мм, длина - 10 м. Меньше это сопротивление или больше, чем у проволоки тех же размеров из алюминия с тем же содержанием железа?

Задание II -22. Изучите дисилицид молибдена, как жаростойкий материал для резисторов - свойства (физические, электрические), область применения. Пользуясь найденными параметрами решите задачу: К двум коаксиальным цилиндрам из дисилицида молибдена с наружными диаметрами 10 и 15 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 0,5 м приложено по концам напряжение 3 В. Найти значения токов в том и другом цилиндре.

Задание II -23. Опишите физические и электрические свойства, область применения контактной композиции КМК-А32. При замыкании высокоточных контактов, выполненных из контактной композиции КМК-А32 они коснулись друг друга площадками с радиусом 0,3 мм. Оцените значение сопротивления такого контакта.

Задание II -24. Опишите конденсаторные керамические материалы с линейной поляризацией и выберите из них такой, конденсатор из которого с емкостью 12 пФ, будет иметь наименьшее сопротивление изоляции. Рассчитайте это сопротивление.

Задание II -25. Опишите физические и электрические свойства электролитов. Используя раствор хлористого калия, определите потенциал погруженного в него электрода и его изменение при изменении концентрации соли до 30 %. Условия: полушаровый электрод диаметром 1 см погружен с поверхности в 10 % раствор хлористого калия и с него стекает ток 0,5 А.

Задание II -26. Поликристаллический графит - свойства (физические, электрические), область применения. На поверхности земли, удельное сопротивление которой 70 Ом·м вертикально стоит полый цилиндр из поликристаллического графита высотой 1,5 м, наружным диаметром 15 см и толщиной стенки 0,5 см. К верхнему его концу подводится ток 0,3 А. Какова разность потенциалов между этим концом и точкой на поверхности грунта, отстоящей от оси цилиндра на 1 м?

Задание II -27. Фторопласт - свойства (физические, электрические), область применения. Найти погонное значение сопротивления изоляции из фторопласта типа 2М у одножильного экранированного провода с сечением жилы 0,25 мм² и толщиной изоляции 0,5 мм.

Задание II -28. Опишите медь и бронзу как электропроводные материалы и укажите как влияют добавки на электрические характеристики материалов. Решите пример: Одна проволока сечением 2,5 мм² сделана из меди, содержащей с 0,1 % алюминия. Другая - из чистой меди. Во сколько раз длина одной проволоки больше другой, если сопротивление их одинаково?

Задание II -29. Опишите физические и электрические свойства электролитов. Для соляной кислоты рассмотрите следующий пример: Между двумя полушаровыми электродами диаметром 5 мм, погруженными с поверхности в 10 % раствор соляной кислоты протекает ток 3 А. Оцените

разность потенциалов приложенных к этим электродам. Как изменится эта разность потенциалов при повышении концентрации кислоты до 50 %?

Задание II -30. Опишите физические и электрические характеристики меди, область применения. Определите длину и сопротивление медной проволоки марки ММ диаметром 2 мм, если ее масса на катушке составляет 25 кг.

Задание II -31. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия. Обратите внимание на свойства расплава алюминия и разберите следующий пример. Между двумя коаксиальными кольцами находится слой затвердевшего алюминия. Определите, как следует изменить толщину этого слоя в расплавленном состоянии, чтобы сопротивление между кольцами не изменилось?

Задание II -32. Опишите алюминий как материал для проводов линий электропередачи. Пользуясь найденными параметрами, решите задачу: Электрический ток передается через землю с удельным сопротивлением 120 Ом·м на расстояние 15 км и возвращается по алюминиевому проводу марки А из проволоки марки АТ сечением 60 мм². Для ввода тока в землю и вывода из нее используются полусферовые электроды. Определить диаметр этих электродов при условии равенства сопротивлений “земляного” провода и провода из алюминия.

Задание II -33. Опишите физические и электрические свойства, область применения хромели и константана и определить соотношение их длин при одинаковых сечении и сопротивлении.

Задание II -34. Опишите сталь и медь как материал для проводов и определите сопротивление 1 км провода для телефонной связи. Провод состоит из 7 стальных жил из стали марки 10 диаметром 0,1 мм и одной медной жилы из меди марки МТ того же диаметра.

Задание II -35. Изучите контанолы. Подберите и опишите такой контанола, чтобы сопротивление изоляции между пластинами было бы не менее 1 Ома. Условие: Две металлические пластины площадью 1 м² склеиваются лаком таким образом, что толщина контанола между пластинами составляет 0,2 мм.

Задание II -36. Изучите алюминиевые сплавы. Разберите пример: По трёхфазной системе шин электроустановки с номинальным напряжением 10 кВ передается мощность 10 МВт. Шины выполнены из алюминиевого сплава АДО, имеют прямоугольное сечение с размерами $4 \times 40 \text{ мм}^2$ и температуру в установившемся режиме $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Опишите физические, электрические свойства и область применения указанного сплава и определите потери мощности в шинах, если их длина 20 м.

Задание II -37. Опишите физические, электрические свойства и область применения алюминия. Определите, какое значение превышал ток короткого замыкания в электрической сети, если время между началом замыкания и его отключением составило 0,12 с, а начальная температура алюминиевых проводов воздушной линии электропередачи была $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Дополнительные условия: При коротком замыкании в сети 110 кВ фазный провод из алюминия сечением 120 мм^2 нагрелся до температуры, составляющей 20 % от значения температуры плавления провода.

Задание II -38. Изучите алюминий - физические и электрические свойства, область применения. Определите, до какой температуры нагреются алюминиевые провода электрической сети сечением 120 мм^2 при отключении короткого замыкания основной защитой через 0,08с. А также определите температуру проводов в случае, когда основная защита отказывает, и работает резервная со временем действия 0,5 с. Мощность трехфазного короткого замыкания в сети 110 кВ составляет 3 ГВт. Начальная температура проводов $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задание II -39. Опишите медь и алюминий, как материалы для изготовления проводов. Определите, какое сечение должен иметь алюминиевый провод, чтобы при токе короткого замыкания 10 кА, протекающем в течение 1 с, он нагрелся бы до той же температуры, что и медная шина. Медная шина прямоугольного сечения $40 \times 4 \text{ мм}^2$ присоединена к алюминиевому проводу последовательно. Начальная температура проводов $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задание II -41. Опишите физические и электрические свойства и область применения нихрома, в том числе сплава X13Ю4. Определите максимальную длину нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм из этого сплава для изготовления нагревателя мощностью 1 кВт на напряжение 220 В. Температура нагрева проволоки должна быть оптимальной, а плотность тока лежать в допустимом диапазоне.

Задание II -42. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и алюминия. Разберите пример: По трехфазной воздушной линии напряжением 380/220 В передается мощность 5 кВт. Два провода линии выполнены из проволоки АТ сечением 16 мм², а третий - из проволоки ММ диаметром 2 мм. Определите потери в перечисленных материалах при длине линии 100 м.

Задание II -43. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и алюминиевых проводов. Выполните расчеты для следующего случая: Мощность, передаваемая в отдельный коттедж, составляет 6 кВт. Питание осуществляется по двухпроводной линии напряжением 220 В длиной 0,5 км. Провода линии выполнены из алюминиевой проволоки марки АТ сечением 25 мм². Определите удельное сопротивление материала проволоки, сравните его с удельным сопротивлением чистого алюминия. Рассчитайте, каким должно быть напряжение на подстанции, чтобы на щитке дома оно было номинальным ?

Задание II -44. Опишите физические и электрические свойства и область применения нихрома, в том числе сплава X20Н80. Какой минимальной длины нужно взять нихромовую проволоку из этого сплава, если ее диаметр 0,3 мм и из нее необходимо изготовить нагреватель на напряжение 220 В мощностью 1 кВт. Температура нагрева проволоки должна быть оптимальной, а плотность тока лежать в допустимом диапазоне.

Задание II -45. Опишите медь как материал для плавких вставок (физические и электрические свойства, область применения). Выберите диаметр медной проволоки для плавких вставок, которые за 0,5 с

расплавлялись бы от тока в 2 раза превышающего ток нагрузки. Мощность трехфазной нагрузки 10 кВт, напряжение сети 380/220 В.

Задание II -46. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминиевых сплавов, в том числе сплава АД 31. Определите потери мощности в шинах из этого сплава, если их длина - 100 м. По двум шинам электроустановки постоянного тока напряжением 3,3 кВ передается мощность 6 МВт. Шины имеют прямоугольное сечение $5 \times 50 \text{ мм}^2$ и температуру в установившемся режиме $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задание II -47. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия. Определите, какое максимальное сечение было у проводов воздушной линии электропередачи напряжением 220 кВ, если при коротком замыкании в сети, фазный провод, состоящий из двух алюминиевых проводов, нагрелся до температуры плавления. Ток короткого замыкания составил 17,7 кА, замыкание отключилось через 5 с, а начальная температура проводов была $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задание II -48. Опишите алюминий - как материал для изготовления проводов (физические и электрические свойства, область применения). Рассчитайте пример: Мощность трехфазного короткого замыкания в сети 220 кВ составляет 25 ГВт. Определите, существует ли опасность расплавления проводов из алюминия сечением $2 \times 70 \text{ мм}^2$ в случаях работы основной и резервной защит на отключение. Времена отключения равны соответственно 0,12 и 0,7 с. Начальная температура проводов $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задание II -49. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и алюминия. Определите сечение медной шины при следующих условиях: К медной шине подсоединен алюминиевый провод сечением 120 мм^2 . При токе короткого замыкания 10 кА, протекающего в течение 1 с, медная шина нагревается до той же температуры, что и алюминиевый провод. Начальная температура проводов $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задание II -50. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихрома, в том числе сплава ХН70Ю. Определите минимальное

количество в метрах нихромовой проволоки диаметром 1 мм, необходимой для выполнения 3-х фазного нагревателя мощностью 10 кВт на напряжение 380/220 В.

Задание II -51. Опишите медь и алюминий как материалы, применяемые для изготовления проводов (физические и электрические свойства, область применения). Сделайте расчёты для следующего примера: От трехфазной сети 380/220 В питается электропечь, потребляющая мощность 3 кВт. Проводка к электропечи выполнена двухжильным медным проводом (МТ) диаметром 1,78 мм и одножильным алюминиевым (проволока марки АМ) диаметром 4,5 мм. Определите потери мощности в электропроводке на длине 10 м от распределительного щитка до электропечи.

Задание II -52. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия. Определите сечение проводов, питающих животноводческую ферму, при условии, чтобы напряжение на оборудовании было не менее 380 В. Мощность работающего оборудования на животноводческой ферме составляет 20 кВт. Ферма питается от трехфазной сети с номинальным напряжением 0,4 кВ. Питающая линия выполнена из алюминиевых проводов марки А, проволоки марки АТ и имеет длину 2 км.

Задание II -53. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихрома, в частности, марки Х15Н60. Сделайте расчёты нагревателя из нихрома. Необходимо изготовить трехфазный нагреватель для сети 0,4 кВ мощностью 5 кВт. Для этой цели имеется проволока диаметром 0,3 мм. Определите сколько метров проволоки необходимо для изготовления трёхфазного нагревателя ?

Задание II -54. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и поливинилхлорида. Разберите пример: Кабель с алюминиевой жилой и поливинилхлоридной изоляцией работает при длительно допустимой рабочей температуре. Сечение жилы - 50 мм². Определите, какой ток короткого замыкания сможет пропустить кабель в

течение 0,5 с, чтобы температура изоляции не превысила предела ее текучести ?

Задание II -55. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и полиэтилена. Сделайте следующие расчёты. Алюминиевая проводка сечением $2,5 \text{ мм}^2$ имеет изоляцию из полиэтилена высокого давления. При коротком замыкании, ток которого 50 А, не сработали автоматические выключатели. Определите через какое время может начать плавиться изоляция ?

Задание II -56. Опишите медь и алюминий. Рассчитайте, каким должно быть сечение медной проволоки в предохранителе, чтобы при коротком замыкании в сети предохранитель бы расплавился через 0,5 с, а электропроводка нагрелась бы при этом с температуры $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $90 \text{ }^\circ\text{C}$? Электропроводка выполнена алюминиевым проводом сечением $2,5 \text{ мм}^2$.

Задание II -57. Опишите физические и электрические свойства нихрома и нихромовой проволоки из сплава Х20Н80. Определите, какой минимально возможный ток нагреет эту проволоку до предельной температуры за 1 с, если ее диаметр равен 0,6 мм.

Задание II -58. Опишите физические и электрические свойства нихрома и конструкционной стали марки 10. Пользуясь найденными параметрами, определите минимальный диаметр стальной проволоки, удельная выделяемая мощность в которой была бы равна удельной мощности, выделяемой в нихромовой проволоке из нихрома марки Х15Н60 диаметром 0,6 мм при условии, что обе проволоки соединены последовательно.

Задание II -59. Опишите алюминий как материал для проводов. Пользуясь найденными параметрами, решите задачу: Ток можно передать через землю при помощи алюминиевой оболочки кабеля или используя два полушаровых заземлителя радиусом 3 м. Для последнего случая удельное сопротивление грунта равно $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а допустимая плотность тока с поверхности заземлителей по условию невысыхания грунта составляет $1 \text{ А}/\text{м}^2$. Определите сечение алюминиевой оболочки кабеля длиной 1 км в которой выделяемая

мощность в 40 раз меньше мощности, выделяемой при передаче тока через землю. Чему равна мощность, теряемая в оболочке ?

Задание II -60. Опишите алюминий как материал для проводов линий электропередачи. Пользуясь найденными параметрами, решите следующую задачу: Провод линии электропередачи марки АС120/19 имеет стальной сердечник из 7-и стальных проволок диаметром 1,88 мм и навив из 26-и алюминиевых проволок диаметром 2,7 мм. До какой температуры нагреются алюминиевые и стальные проволоки от тока короткого замыкания 50 кА за 1 секунду, если их начальная температура была 20 °С ? Расчет провести, пренебрегая теплопроводностью. В качестве параметров стали принять: удельное сопротивление и плотность - для марки НЖ, теплоемкость и температурный коэффициент удельного сопротивления - для резистивного сплава Х13Ю4.

Задание II -61. Между двумя коаксиальными кольцами из меди находится слой алюминия. Диаметр и длина внутреннего кольца 1 см. Опишите физические и электрические свойства алюминия и определите ток, который за 1 с доведет алюминий до плавления у внутреннего кольца

Задание II -62. Опишите физические и электрические свойства меди и припоя ПОС-90, области применения. Решите с использованием найденных параметров задачу: Медный провод сечением 3 мм² и длиной 1 см запаивается припоем ПОС-90 в цилиндрическую втулку. При каком токе, протекающем от провода к втулке через 1 секунду начнет плавиться припой ?

Задание II -63. Опишите свойства меди и определите ее массу в катушке. По катушке с медным проводом сечением 2,5 мм² протекает постоянный ток 20 А. При этом в катушке выделяется мощность 20 Вт. Нагревом провода пренебречь.

Задание II -64. Опишите физические и электрические свойства вольфрама и молибдена. Определите длину раскаленной до 2000 °С вольфрамовой нити диаметром 0,02 мм в электролампочке мощностью 40 Вт. Какой в этих условиях была бы длина такой же нити из молибдена ?

Задание II -65. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихрома, в частности, сплава Х13Ю4. Определите массу нихромовой проволоки диаметром 0,6 мм для изготовления нагревателя мощностью 1 кВт на напряжение 220 В.

Задание II -66. Опишите физические и электрические свойства, область применения алюминия и определите потери энергии в электропроводке к коттеджу за 1 месяц. Мощность, передаваемая в отдельный коттедж, составляет 10 кВт. Питание осуществляется по двухпроводной линии напряжением 220 В длиной 0,5 км, выполненной из алюминиевых проводов марки А сечением 16 мм^2 , свитых из проволоки марки АТ.

Задание II -67. Опишите физические и электрические свойства, область применения нихромовой проволоки из сплава Х20Н80. Сколько грамм такой проволоки диаметром 1 мм необходимо для того, чтобы изготовить нагреватель на напряжение 220 В мощностью 3 кВт ?

Задание II -68. Опишите физические и электрические свойства, область применения меди и полиэтилена и определите плотность тока, при которой через 1 с после начала протекания тока температура бы не превышала допустимое значение для изоляции. Медный провод в полиэтиленовой изоляции имеет начальную температуру 40°C .

Задание II -69. Опишите физические, электрические свойства и области применения стального (марка «сталь10») алюминиевого и медного проводов и определите значения токов, при которых погонные потери составят 1 кВт/км при сечениях, равных для всех проводов 6 мм^2 .

Задание II -70. Опишите физические и электрические свойства меди и припоя ПОС-90, области применения. Решите с использованием найденных параметров задачу: Медный провод диаметром 5 мм и длиной 1 см запаивается припоем ПОС-90 в цилиндрическую втулку. Через сколько времени от тока 4 кА, протекающего от провода к втулке, начнет плавиться припой, если его начальная температура была 150°C ?

Задание II -71. Опишите свойства алюминия и определите его массу в катушке из алюминиевого провода. По катушке с алюминиевым проводом сечением $2,5 \text{ мм}^2$ протекает постоянный ток 15 А . При этом в катушке выделяется мощность 40 Вт .

Задание II -72. Опишите физические и электрические свойства вольфрама и константана. Определите соотношение масс последовательно соединенных проволок из этих материалов при одинаковых сечении и выделяемой мощности.

Задание II -73. Опишите свойства никеля, и высоконагревостойкую стеклокерамическую изоляцию проводов. Выберите материал для изоляции никелевого провода по условиям нагрева. Никелевый провод диаметром $0,5 \text{ мм}$ предназначен для односекундного протекания тока 23 А .

Задание II -74. Опишите физические и электрические свойства стали и темплена термостойкого, область их применения. Решите с использованием найденных параметров задачу: Провод имеет стальную жилу диаметром $0,2 \text{ мм}$ (марка «сталь 10», теплоемкость и температурный коэффициент сопротивления принять для железа) и изоляцию из темплена. Какой ток должен протекать по жиле, чтобы изоляция на границе с проводом за 1 с нагрелась бы до максимальной рабочей температуры темплена ?

Задание II -75. Определить сопротивление клеммы аккумулятора, выполненной из свинца, $L = 25 \text{ мм}$, $S = 8,5 \text{ мм}^2$.

Задание II -76. Сколько килограммов меди можно сэкономить на 1 км кабеля, если для изготовления взять материал с удельным сопротивлением $0,0175 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, вместо нормативного $0,01840 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Задание II -77. На сколько процентов возрастет сопротивление медного провода, если его температура увеличится на 50°C , на 70°C .

Задание II -78. Определить длину проволоки диаметром $1,5 \text{ мм}$, необходимой для изготовления электронагревательного элемента, удельное сопротивление

которого ρ =(определить по справочнику для нихрома) мощность 700Вт, напряжение 220В.

Задание II -79. На сколько процентов возрастет сопротивление алюминиевого провода, если он работает при температуре 60°C .

Задание II -80. На одну из одинаковых катушек намотан медный провод, а на другую алюминиевый. Какой провод и во сколько раз длинее, если известно, что сопротивление и масса проводов одинаковые.

III Раздел “ Магнитные свойства материалов. Магнитные материалы ”

Относительная магнитная проницаемость:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (\text{III.1})$$

где B – индукция;

H – напряжённость магнитного поля;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \text{ – магнитная постоянная;}$$

Потери на гистерезис за один цикл:

$$P_H = \eta B_{\text{макс}}^n f V, \quad (\text{III.2})$$

где η – коэффициент, зависящий от материала;

$B_{\text{макс}}$ – максимальная индукция, Тл;

n – показатель степени, равный 1.6-2;

f – частота тока, Гц.

Мощность, расходуемая на вихревые токи:

$$P_1 = \xi B_{\text{макс}}^2 f^2 V, \quad (\text{III.3})$$

где f – частота тока, Гц;

V – объём ферромагнетика, м^3 ;

$B_{\text{макс}}$ – максимальная индукция, Тл ;

ξ – коэффициент, зависящий от материала.

Тангенс угла магнитных потерь катушки индуктивности:

$$\operatorname{tg} \delta_v = \frac{r_1}{\omega L}, \quad (\text{III.4})$$

где r_1 – эквивалентное сопротивление, Ом ;

L – эквивалентная индуктивность, Гн ;

ω – частота угловая, с⁻¹.

Максимальная энергия размагничивания:

$$W_{\text{макс}} = \frac{B'_d H'_d}{2}, \quad (\text{III.5})$$

где H'_d – напряжённость поля, $\frac{A}{m}$;

B'_d – индукция поля, Тл .

Выпуклость петли размагничивания:

$$\gamma = \frac{(BH)_{\text{макс}}}{2B_r H_c}, \quad (\text{III.6})$$

где B_r – остаточная индукция, Тл ;

H_c – коэрцитивная сила, $\frac{A}{m}$;

$(BH)_{\text{макс}}$ – произведение максимальной индукции и напряжённости поля.

Коэффициент прямоугольности петли гистерезиса:

$$K_n = \frac{B_r}{B_{\text{макс}}}, \quad (\text{III.7})$$

где B_r – остаточная индукция, Тл ;

$B_{\text{макс}}$ – максимальная индукция, Тл .

Магнитная проницаемость – величина безразмерная.

При малой напряженности внешнего магнитного поля (или его отсутствии), когда магнитные моменты доменов магнитного материала образуют замкнутые магнитные цепи, магнитная проницаемость минимальна и носит название «начальная магнитная проницаемость» – $\mu_{\text{нач}}$.

Увеличение напряженности магнитного поля приводит к необратимому смещению доменных границ, ориентации векторов намагниченности доменов по полю и увеличению магнитной проницаемости вплоть до **«максимальной магнитной проницаемости»** – $\mu_{\text{макс}}$. При дальнейшем увеличении напряженности внешнего магнитного поля происходит полная ориентация магнитных моментов доменов по полю и материал переходит в состояние технического насыщения. Магнитная проницаемость уменьшается, стремясь к 1.

В силу зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля зависимость индукции в материале от напряженности внешнего магнитного поля нелинейна. Эта зависимость называется **«начальной кривой намагничивания»** и показана на рис. III.1. На рис III.2 показана зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля, построенная для того же материала.

Комплекс магнитных свойств магнитного материала описывается кривыми намагничивания-размагничивания (зависимостью индукции в материале от напряженности переменного магнитного поля) – петлями гистерезиса (hysteresis – отставание, запаздывание). Наиболее информативной является предельная петля гистерезиса, когда индукция в материале достигает максимально возможного значения для образца

(материал полностью намагничен). Предельная петля гистерезиса определяет следующие параметры магнитного материала:

- начальная магнитная проницаемость, $\mu_{\text{нач}}$ (при напряженности магнитного поля на начальной кривой намагничивания близкой к нулю);
- максимальная магнитная проницаемость, $\mu_{\text{макс}}$ (в точке кривой намагничивания с максимальным значением производной);
- индукция насыщения, $B_{\text{нас}}$ (индукция полного намагничивания образца. **Индукция технического насыщения** – значение индукции магнитного материала, определяемое экстраполяцией из области напряжённости магнитных полей, соответствующих намагниченности технического насыщения, к нулевому значению напряжённости поля);
- остаточная индукция, $B_{\text{ост}}$ (индукция, сохраняющаяся в магнитном материале после намагничивания его до намагниченности технического насыщения и уменьшения напряженности магнитного поля в нём до нуля.
- коэрцитивная сила, H_c (величина, равная напряжённости магнитного поля, необходимого для изменения магнитной индукции от остаточной индукции до нуля. По значению коэрцитивной силы различают магнитомягкие $H_c \leq 800$ А/м и магнитотвёрдые $H_c \geq 4000$ А/м материалы);
- магнитные потери на гистерезис – потери энергии на перемагничивание, пропорциональные площади, охватываемой петлей гистерезиса.

Петля гистерезиса представлена на рисунке III.3:

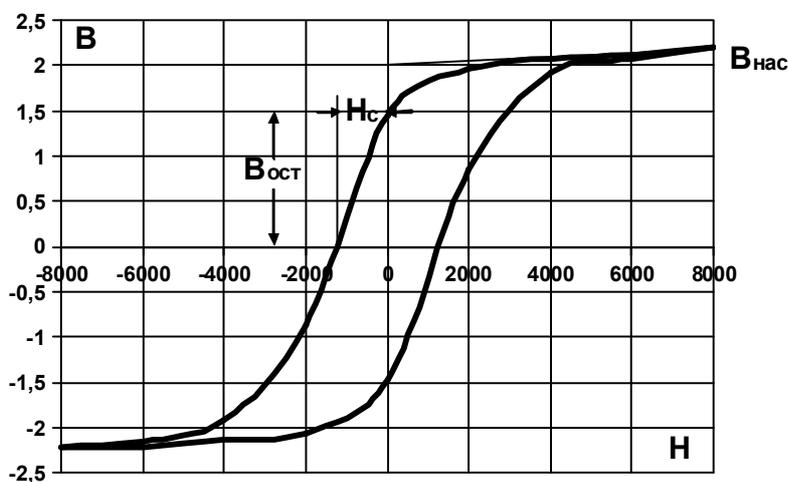


Рис III.3. Предельная петля гистерезиса

Магнитные потери бывают двух видов:

Потери на перемагничивание (на гистерезис) – потери энергии, нагревающие магнитный материал и связанные с перестройкой доменов в переменном магнитном поле. Удельная мощность потерь, расходуемых на гистерезис, пропорциональна максимальному значению индукции $B_{\text{макс}}$ (возникающей в материале при перемагничивании) в степени 1,6...2,0 и частоте, f :

$$P_{\text{гист}} \sim B^{(1,6...2)} f. \quad (\text{III.8})$$

Потери на вихревые токи – потери энергии, нагревающие магнитный материал и обусловленные индуктированными в нем переменным магнитным полем вихревыми токами, большими при большей электропроводности материала. Удельная мощность потерь, расходуемых на вихревые токи, пропорциональна квадрату максимального значения индукции $B_{\text{макс}}$ (возникающей в материале при перемагничивании) и квадрату частоты, f :

$$P_{\text{вихр}} \sim B^2 f^2. \quad (\text{III.9})$$

Пример решения задач

1. Задание.

Опишите электротехнические стали с нормированными магнитными свойствами в переменных полях, в частности, стали 1511 и 1521. Оцените потери в стали 1521 при частоте 50 Гц и напряженности внешнего магнитного поля 2500 А/м и сравните эти потери с потерями в стали 1511 при тех же условиях.

2. Определение величин, необходимых для выполнения задания.

Магнитные потери являются нормированной характеристикой электротехнической стали, и даются в справочниках. Поскольку справочные данные приводятся при определенных условиях (например, при определенной напряженности магнитного поля или определенной индукции

в материале), то можно предположить, что данная в задании напряжённость поля (и соответствующая ей индукция) не соответствуют нормированным условиям. Для оценки потерь необходимо привести условия задания к нормируемым. Для этого воспользуемся выражениями для потерь на перемагничивание: $P_{\text{гист}} = \alpha B^{(1,6...2)} f$, и на вихревые токи: $P_{\text{вихр}} = \beta B^2 f^2$.

В этих выражениях B и f , соответственно индукция и частота, соответствующие нормируемым условиям определения потерь. Если их найти в справочных данных, то можно определить коэффициенты α и β , а потом – привести потери к условиям, заданным в задании. Возможно, потребуется пересчёт заданной напряжённости поля в индукцию по

выражению: $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$, где μ – магнитная проницаемость рассматриваемых сталей при заданной напряжённости магнитного поля H .

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

Сталь - это сплав железа с углеродом при содержании углерода менее 2,14 %. /1/.

Магнитные потери – превращение энергии электромагнитного поля в тепло за счёт перемагничивания и вихревых токов. Вихревые токи – токи, возникающие в электропроводящем магнитном материале по закону электромагнитной индукции (при переменном магнитном потоке)

Магнитная индукция (В) – векторная величина, равная плотности магнитного потока в заданной точке: $B = d\Phi/dS$ /2/.

Магнитная проницаемость, μ – это физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции при воздействии магнитного поля. Для изотропных сред магнитная проницаемость равна отношению индукции в среде B к напряженности внешнего магнитного поля H и к магнитной постоянной μ_0 /1/.

3. Описание материалов.

Электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях относятся к магнитомягким металлическим материалам /3, стр. 18-31/.
Электротехнические стали обычно легируются кремнием. Легирование кремнием вызывает: уменьшение коэрцитивной силы, увеличение удельного сопротивления и снижения потерь на вихревые токи, некоторое снижение индукции насыщения, большую магнитную проницаемость в слабых и средних полях вследствие магнитной мягкости материала.

В обозначении марок цифры означают:

Первая – класс по структурному состоянию и виду прокатки:

- 1 – горячекатаная, изотропная;
- 2 – холоднокатаная изотропная;
- 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой;
- 5 - холоднокатаная анизотропная с плоской кубической текстурой.

Вторая – содержание кремния:

- 0 – до 0,4% (нелегированная);
- 1 – (0,4...0,8) %;
- 2 - (0,8...1,8) %;
- 3 - (1,8...2,8) %;
- 4 - (2,8...3,8) %; удельные потери нормируются при магнитной индукции $B=1,5$ Тл и частоте $f = 50$ Гц;
- 5 - (3,8...4,8) %.

Третья – группу по основной нормируемой характеристике:

- 0 – удельные потери при магнитной индукции $B=1,7$ Тл и частоте $f = 50$ Гц;
- 1 - удельные потери при магнитной индукции $B=1,5$ Тл и частоте $f = 50$ Гц;
- 2 - удельные потери при магнитной индукции $B=1,0$ Тл и частоте $f = 400$ Гц;
- 4 -удельные потери при магнитной индукции $B=0,5$ Тл и частоте $f = 3000$ Гц;

6 – магнитная индукция в слабых полях при напряженности поля $H=0,4$ А/м;

7 - магнитная индукция в средних полях при напряженности поля $H=10$ А/м.

Четвёртая - порядковый номер типа стали.

Таким образом, заданные электротехнические стали характеризуются следующим образом:

1511 – горячекатаная изотропная сталь, с содержанием кремния - (3,8...4,8) %, удельные потери нормируются при магнитной индукции $B=1,5$ Тл и частоте $f = 50$ Гц, тип стали – 1.

1521 – эта сталь отличается от предыдущей только тем, что удельные потери нормируются при магнитной индукции $B=1,0$ Тл и частоте $f = 400$ Гц,

Эти стали поставляются в виде листов толщиной 0,1...1,0 мм шириной 500...1000 мм и длиной 600...2000 мм.

Электротехнические кремнистые стали применяются для изготовления двигателей и генераторов, дросселей и трансформаторов, электромагнитных механизмов и реле, работающих как на постоянном, так и на переменном токе различной частоты.

Нормированные характеристики сталей рассматриваемых марок приведены в таблице 2.

Таблица 2

Нормированные характеристики сталей марок 1511 и 1521 /3/
(выбраны стали с одинаковой толщиной листа – 0,35 мм)

Марка	Удельные потери Вт/кг при индукции, Тл, равной			Магнитная индукция, Тл при напряжённости магнитного поля, А/м, равной					
	0,75	1	1,5	500	1000	2500	5000	10000	30000
1511		1,35	3,0		1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
1521	10,75	19,5		1,21	1,30	1,44			

4. Решение.

Опишите электротехнические стали с нормированными магнитными свойствами в переменных полях, в частности, стали 1511 и 1521. Оцените потери в стали 1521 при частоте 50 Гц и напряженности внешнего магнитного поля 2500 А/м и сравните эти потери с потерями в стали 1511 при тех же условиях.

В соответствии с маркой стали магнитные потери для стали 1521 нормируются при магнитной индукции $B=1,0$ Тл и частоте $f = 400$ Гц и составляют 19,5 Вт/кг (табл. 2). При напряженности внешнего магнитного поля 2500 А/м индукция в стали 1521 составляет 1,44 Тл (см. табл. 2). Следовательно, нормированные потери необходимо привести к условиям задания. Поскольку сталь магнитомягкая, то приближенно можно считать, что основная доля потерь – это потери на вихревые токи. Поэтому воспользуемся формулой потери на вихревые токи.

$$P_{\text{норм}} = \beta B_{\text{норм}}^2 \times f_{\text{норм}}^2. \quad \text{искомые потери: } P_x = \beta B_{1,44}^2 \times f_{50}^2.$$

$$\text{Для стали 1521: } P_x = P_{\text{норм}} \frac{B_{1,44}^2 \times f_{50}^2}{B_{\text{норм}}^2 \times f_{\text{норм}}^2} = 19,5 \frac{1,44^2 \times 50^2}{1^2 \times 400^2} = 0,632 \text{ Вт/кг}$$

Для стали 1511 потери нормируются при индукции 1,5 Тл. Поскольку у этой стали при напряженности поля 2500 А индукция составляет 1,44 Тл, то нормируемые потери увеличатся в $1,5^2/1,44^2 = 1,085$ раза, то есть составят $3 \text{ Вт/кг} \times 1,085 = 3,255 \text{ Вт/кг}$.

5. Вывод.

Если сталь 1521, предназначенную для работы при частоте 400 Гц применять в условиях, аналогичных применению стали 1511, то есть при частоте 50 Гц, то магнитные потери в стали 1521 будут меньше, чем в стали 1511.

Задачи по разделу “Магнитные свойства материалов. Магнитные материалы”

Задание III-01. Опишите электротехнические нелегированные стали. Постройте кривую намагничивания электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 11036-75) марки 10864 в постоянном поле.

Задание III -02. Опишите электротехнические горячекатаные стали. Постройте зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для электротехнической стали (ГОСТ 21427.3-75) марки 1571 для листа толщиной 0,35 мм.

Задание III -03. Опишите электротехнические холоднокатаные стали. Определите удельные потери в магнитопроводе из листов холоднокатаной стали типа 2 (ГОСТ 21427.2-83) с содержанием кремния до 0,4 %, толщиной листа 0,65 мм, при напряженности поля 1000 А/м, частоте 50 Гц, учитывая коэффициент заполнения, равный 0,93.

Задание III -04. Опишите электротехнические горячекатаные стали. Постройте кривую зависимости удельных потерь в горячекатаной стали (ГОСТ 21427.3-75) марки 1211 при толщине листа 0,5 мм от напряженности магнитного поля в диапазоне 2500...30000 А/м при частоте 50 Гц.

Задание III -05. Опишите электротехнические горячекатаные стали. В магнитопроводе объемом $0,51 \text{ м}^3$, выполненном из листов 0,35 мм горячекатаной стали марки 1411 (ГОСТ 21427.3-75) с коэффициентом заполнения 0,98, общие потери в стали составляют 13 кВт. Определите напряженность магнитного поля.

Задание III -06. Опишите электротехнические горячекатаные стали. В сталях для переменных полей третья цифра марки, равная 0 или 1, означает, что удельные потери нормируют при частоте 50 Гц. Полагая, что основную массу составляют потери на вихревые токи, найти для стали марки 1511 значения удельных потерь для частоты 400 Гц при напряженности магнитного поля 2500 А/м и толщине листа 0,35 мм и сравнить их с потерями для стали 1521.

Задание III -07. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. Полагая, что все потери определяются вихревыми токами, определите удельные потери для стали 3441 с толщиной листа 0,03 мм при напряженности магнитного поля 2500 А/м и частоте 3000 Гц. Определите при этих условиях относительную магнитную проницаемость стали.

Задание III -08. Опишите магнитомягкие сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса. Определите, во сколько раз магнитная индукция в сердечнике из лент толщиной 0,01 мм сплава 79 НМ (ГОСТ 10160-75) при напряженности магнитного поля 7 А/м будет меньше индукции насыщения. Магнитную проницаемость принять равной начальной.

Задание III -09. Опишите магнитомягкие сплавы с повышенным электрическим сопротивлением. Определите, во сколько раз напряженность магнитного поля при индукции, близкой к индукции насыщения, больше коэрцитивной силы для ленты толщиной 0,50 мм из сплава 50НХС класса II полагая, что относительная магнитная проницаемость достигла значений начальной.

Задание III -10. Опишите магнитомягкие сплавы с низкой остаточной индукцией. У сплава марки 47 НК сняли кривую намагничивания при температуре 20° С в интервале напряженностей магнитного поля 100...1000 А/м. Затем, не ослабляя напряженности, охладили образец до - 60° С и сняли обратный ход кривой. Воспроизведите на графике результаты опыта.

Задание III-11. Опишите марганцево-цинковые ферриты. Постройте кривую намагничивания ферритового стержня марки 3000НМ при частоте 0,1 МГц в диапазоне напряженности поля 0...32 А/м.

Задание III-12. Опишите никель-цинковые ферриты. Считая температурный коэффициент магнитной проницаемости неизменным в диапазоне напряженностей магнитного поля 0...10 А/м, постройте зависимость магнитной индукции в феррите 2000НН от температуры при

напряженности поля 8 А/м и в диапазоне температур 0...70 ° С. Что произойдет при нагревании образца до 100 °С ?

Задание III-13. Опишите ферриты для телевизионной техники. У сердечника из феррита группы IV типа 2500НМС1 при температуре 20 °С сняли кривую зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в диапазоне 0...320 А/м, после чего феррит нагрели до 100 °С и сняли обратный ход кривой. Постройте полученные кривые.

Задание III-14. Опишите ферриты для телевизионной техники. Определите, во сколько раз отличаются магнитные потери двух образцов феррита IV группы типа 2500НМС1, если первый имеет диаметр 0,8 см, длину 10 см и находится в поле напряженностью 30 А/м, а второй соответственно 0,5 см, 8 см и 40 А/м. Температура комнатная, частота 16 кГц.

Задание 4-15. Опишите ферриты для импульсных трансформаторов. Определите оптимальные значения магнитной индукции в ферритовом сердечнике из феррита группы V марки 300ННИ при частоте 0,5...5 кГц.

Задание III-16. Опишите ферриты для датчиков температуры. При нагреве масла в трансформаторе выше 70 °С необходимо включать охлаждающие вентиляторы. Если использовать в качестве датчика катушку с ферритовым сердечником, то какую марку феррита следует выбрать ?

Задание III-17. Опишите магнитодиэлектрики из пермаллоя. Постройте петлю гистерезиса для магнитодиэлектрика из пермаллоя марки П-250.

Задание III-18. Опишите магнитотвердые материалы. Определите значение относительной магнитной проницаемости магнитотвердого сплава “железо-хром-кобальт” марки 28Х10К в точке кривой размагничивания, где произведение индукции в материале на напряженность магнитного поля максимально.

Задание III-19. Опишите термомагнитные материалы. Постройте зависимость магнитной индукции от температуры для термомагнитного материала 33НХЗ при напряженности магнитного поля 112 кА/м.

Задание III-20. Опишите ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Постройте предельные петли гистерезиса для феррита типа ППГ марки 100П.

Задание III-21. Опишите аморфные магнитные материалы. Сердечник из аморфного магнитного сплава марки 10НСР имеет площадь поперечного сечения 1 см^2 и общую длину 10 см и работает при индукции 0,1 Тл. Постройте зависимость магнитных потерь в этом сердечнике от частоты.

Задание III-22. Опишите аморфные магнитные материалы. Масса сердечника из аморфного магнитного сплава 10НСР – 100 г. Определите зависимость магнитных потерь в нем от напряженности магнитного поля в диапазоне 0...120 А/м при частоте 10 кГц.

Задание III-23. Опишите ферриты для импульсных трансформаторов. Импульсный трансформатор на сердечнике из феррита 1000ННИ объемом 12 см^3 работает при температуре 20° С . Постройте зависимость потерь в нем от напряженности магнитного поля для импульсов длительностью 3 мкс с частотой следования 5 кГц.

Задание III-24. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Определите по имеющимся данным значения магнитной проницаемости сортовой электротехнической стали марки 10864 (ГОСТ 11036-75) в диапазоне напряженности магнитного поля 500...30000 А/м.

Задание III-25. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Определите магнитную проницаемость электротехнической стали по ГОСТ 21427.3-75 марки 1561 для толщин 0,20 и 0,35 мм при нормируемой магнитной индукции.

Задание III-26. Выберите среди магнитомягких сплавов и опишите физические, механические электрические и магнитные свойства такой марки, у которой в слабом магнитном поле магнитная проницаемость наивысшая. Вычислите для этого сплава необходимую напряженность магнитного поля, при которой происходит насыщение магнитопровода.

Задание III-27. Среди магнитомягких сплавов выберите и опишите физические, механические, электрические и магнитные свойства такой марки, у которой электрическое сопротивление наибольшее. Вычислите для этой марки индукцию в магнитопроводе при напряженности магнитного поля 800 А/м и сравните ее с индукцией насыщения.

Задание III-28. Выберите среди магнитомягких сплавов с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения марку с максимальной индукцией насыщения. Опишите физические, механические, электрические и магнитные свойства этой марки и определите, при какой напряженности магнитного поля произойдет полное намагничивание сплава.

Задание III-29. Среди магнитомягких сплавов с высокой коррозионной стойкостью выберите сплав с наиболее узкой петлей гистерезиса, опишите его физические, механические, электрические и магнитные свойства и постройте петлю гистерезиса для этого сплава.

Задание III-30. Среди магнитомягких ферритов I группы выберите феррит с максимальной начальной магнитной проницаемостью. Опишите его состав, свойства и постройте для него петлю гистерезиса.

Задание III-31. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Постройте кривую намагничивания электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 3836-83) марки 21864 в постоянном магнитном поле.

Задание III-32. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Постройте графики зависимости относительной магнитной проницаемости стали от напряженности магнитного поля для горячекатаной легированной стали (ГОСТ 21427.3-75) марки 1561 толщиной 0,35 и 0,20 мм.

Задание III-33. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. Определите потери в 1 м^3 стального магнитопровода, имеющего коэффициент заполнения сталью 0,95. Магнитопровод выполнен из холоднокатаной анизотропной стали с

содержанием кремния 2,8...3,8 % при напряженности магнитного поля 100 А/м и частоте 50 Гц. Порядковый номер типа стали – 8, толщина листа – 0,27 мм.

Задание III-34. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. Постройте кривую зависимости удельных потерь в холоднокатаной изотропной стали (ГОСТ 21427.2-83) марки 2012 с толщиной листа 0,65 мм от напряженности магнитного поля в диапазоне 1000-30000 А/м при частоте 50 Гц.

Задание III-35. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. В магнитопроводе объемом 0,21 м³, выполненном из листов холоднокатаной изотропной стали марки 2212 (ГОСТ 21427.2-83) толщиной 0,5 мм с коэффициентом заполнения 0,95, общие потери составляют 7,8 кВт. Определите напряженность магнитного поля.

Задание III-36. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. В сталях, используемых в переменных полях, третья цифра марки, равная 2, означает, что удельные потери нормируют для частоты 400 Гц. Полагая, что основную массу потерь составляют потери на вихревые токи, найдите для стали марки 1521 с толщиной листа 0,35 мм потери при частоте 50 Гц и напряженности магнитного поля 2500 А/м и сравните их с потерями для стали марки 1511.

Задание III-37. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в переменных полях. Полагая, что все потери определяются вихревыми токами, найдите удельные потери для стали 3441 с толщиной листа 0,01 мм при напряженности магнитного поля 2500 А/м и частоте 3000 Гц. Определите при этом относительную магнитную проницаемость стали.

Задание III-38. Опишите магнитомягкие сплавы с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Сердечник выполнен из листов сплава 80 НХС и индукция в нем составляет 0,14 от максимально возможной. Определите напряженность магнитного поля.

Задание III-39. Опишите магнитомягкие сплавы с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения. Полагая, что при индукции, близкой к индукции насыщения, относительная магнитная проницаемость равна начальной, определите для прутка из сплава 50Н, во сколько раз напряженность магнитного поля при насыщении будет больше коэрцитивной силы.

Задание III-40. Опишите магнитомягкие сплавы с низкой остаточной индукцией. У сплава марки 64Н сняли кривую намагничивания при комнатной температуре в диапазоне напряженностей магнитного поля от 50 до 500 А/м. Затем, не ослабляя напряженности, нагрели образец до 120° С и сняли при этой температуре обратный ход кривой. Постройте на графике результаты опыта.

Задание III-41. Опишите никель-цинковые ферриты. Постройте кривую намагничивания ферритового образца марки 1000НН при частоте 0,1 МГц в диапазоне напряженностей магнитного поля от 0 до 32 А/м.

Задание III-42. Опишите марганцево-цинковые ферриты. Полагая температурный коэффициент магнитной проницаемости феррита 3000НМ не зависящим от напряженности магнитного поля, постройте зависимость магнитной индукции от температуры при напряженности 16 А/м в диапазоне температур 0...140 °С.

Задание III-43. Опишите ферриты для телевизионной техники. Образец из феррита IV группы марки 3000 НМС нагрели до 120 °С и при этой температуре сняли зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в диапазоне 0...240 А/м, после чего, не снижая напряженности, образец охладили до комнатной температуры и сняли обратный ход кривой. Постройте на графике полученные зависимости.

Задание III-44. Опишите ферриты для телевизионной техники. Определите, во сколько раз отличаются магнитные потери двух образцов феррита группы IV типа 3000НМС, если один из них имеет диаметр 0,5 см и длину 5 см и

находится в поле напряженностью 20 А/м, а другой соответственно 1 см, 10 см и 40 А/м ? Температура 120 °С, частота 16 кГц.

Задание III-45. Опишите ферриты для импульсных трансформаторов. Определите диапазон возможных значений индукции в ферритовом сердечнике из феррита V группы марки 1100НМИ, работающем при оптимальной напряженности.

Задание III-46. Опишите ферриты для датчиков температуры. Электрошкаф для просушки образцов должен включаться при температуре 85...95 °С и выключаться при нагреве свыше 200 °С. Для управления этим режимом используются две катушки с ферритовыми сердечниками. Какие марки ферритов использованы в этих катушках ?

Задание III-47. Опишите магнитодиэлектрики из пермаллоя. Постройте петлю гистерезиса для сердечника из пермаллоя марки ПК-60.

Задание III-48. Опишите магнитотвердые материалы из сплавов системы ЮНДК. Определите значение магнитной проницаемости магнитотвердого сплава ЮНДК18 по кривой размагничивания в точке с максимальным значением произведения индукции в материале на напряжённость магнитного поля.

Задание III-49. Опишите термомагнитные материалы. Постройте зависимость магнитной индукции от температуры в термомагнитном материале 28НХ4С при напряженности магнитного поля 112 кА/м.

Задание III-50. Опишите ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Постройте предельные петли гистерезиса для феррита типа ППГ марки 5ВТ.

Задание III-51. Опишите аморфные магнитные материалы. Сердечник из аморфного магнитного сплава марки 10НСР имеет площадь поперечного сечения 60 мм² и общую длину 500 мм. Постройте зависимость потерь в этом сердечнике от индукции при частоте 10 кГц.

Задание III-52. Опишите аморфные магнитные материалы. На сердечник из аморфного магнитного сплава марки 10НСР весом 150 г воздействует

магнитное поле напряженностью 80 А/м. Построить зависимость потерь в нем от частоты в диапазоне 1...10 кГц.

Задание III-53. Опишите ферриты для импульсных трансформаторов. Сердечник импульсного трансформатора изготовлен из феррита марки 1100НМИ и имеет объем 16 см³. Постройте зависимость потерь в нем от напряженности импульсного магнитного поля при длине импульса 3 мкс, частоте следования 5 кГц и температуре 40° С.

Задание III-54. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Постройте кривую намагничивания сортовой электротехнической стали (ГОСТ 11036-75) марки 11895 для диапазона напряженностей магнитного поля от 500 до 2500 А/м.

Задание III-55. Опишите электротехнические стали с нормированными свойствами в постоянных полях. Как изменится значение относительной магнитной проницаемости электротехнической стали по ГОСТ 21427.3-75 марки 1562, измеренной при нормируемой магнитной индукции, если ее толщину изменить с 0,20 до 0,35 мм ?

Задание III-56. Опишите магнитодиэлектрики из ферритовых порошков. Выберите самый легкий из бариевых порошкообразных ферритов и опишите его свойства.

Задание III-57. Среди магнитотвердых сплавов найдите и опишите сплавы системы железо-никель-алюминий-кобальт (ЮНДК). Выберите среди них сплав с максимальной удельной магнитной энергией и определите значение магнитной проницаемости при комнатной температуре и напряженности магнитного поля - 40 кА/м.

Задание III-58. Опишите магнитотвердые ферриты. Выберите среди магнитотвердых ферритов по ГОСТ 24063-80 марку с минимальным значением коэрцитивной силы и вычислите для этой марки значение магнитной проницаемости при напряженности магнитного поля - 60 кА/м.

Задание III-59. Описать термомагнитные материалы, называемые термаллоями. Составьте для них таблицу значений магнитной

проницаемости при разных температурах при напряженности магнитного поля 8 кА/м.

Задание III-60. Опишите ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Выберите среди них марку с минимальным удельным электрическим сопротивлением и постройте для нее петлю гистерезиса.

Задание III-61 Для материала, у которого коэрцитивная сила $H_c=64\text{А/м}$ в магнитном поле с магнитной индукцией $B_r=5,6\cdot 10^{-8}\text{Тл}$, найти магнитную проницаемость, определить тип материала, если $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ Гн/м}$.

Задание III-62 Найти значение динамической магнитной проницаемости материала μ , если известно что мощность, расходуемая на гистерезис равна $1,8\cdot 10^{-7}\text{ Дж}$, где высота и ширина образца равны 0,1м, напряженность магнитного поля $H_m=0,8\text{А/м}$, коэффициент, зависящий от материала $\eta = 0,9\text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Частота промышленной сети.

Задание III-63 Определить коэффициент прямоугольности петли гистерезиса для феррита марки 9В4, если для него $B_r\approx 0,06\text{Тл}$, $\mu_{r,\max}=30$, $H_c=1500\text{А/м}$. $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ Гн/м}$.

Задание III-64 Ферритовый сердечник имеет коэффициент прямоугольности $K_{пу}=0,98$, его остаточная индукция равна 0,25Тл, а коэрцитивная сила $H_c=300\text{А/м}$. Найти максимальную индукцию данного сердечника и соответствующее ей значение магнитной проницаемости.

Задание III-65 Сколько грамм никеля нужно взять для получения 1,5 килограмма пермаллоя марки 79НМ и сколько марганца?

Задание III-66 Сколько нужно взять весовых частей составляющих супермаллой (19Ni, 5Mo, 15Fe, 0,5Mn) чтобы получить 200г сплава.

Задание III-67 Задача сплавов ЮНД4 и ЮНД12 определить наибольшее значение коэффициента выпуклости кривых размагничивания и минимальное значение максимальной энергии в воздушном зазоре.

ЮНД4 $B_d=0,3\text{Т}$ $H_c=24\text{кА/м}$ $B_r=0,5\text{Т}$ $H_c=40\text{кА/м}$

ЮНД12 $B_d=0,29\text{Т}$ $H_c=30\text{кА/м}$ $B_r=0,5\text{Т}$ $H_c=52\text{кА/м}$

Задание III-68 Определить максимальную энергию W_{\max} магнитного поля магнита, сделанного из сплава ЮНД4.

Задание III-69 Магнит из сплава ЮНДК24 имеет воздушный зазор между полюсами. Определить максимальную энергию, заключенную в единице объема воздушного зазора.

Задание III-70 Определить потери на вихревые токи для технически чистого железа при изменении частоты от 50 Гц до 1000 Гц.

Задание III-71 Найти значения динамической проницаемости μ_r , если известно, что мощность, расходуемая на перемагничивание равна $P=1,8$ Дж. Размеры сердечника: $h=0,1$ м, длина 0,4 м. Напряженность магнитного поля 0,8 А/м. Материал – сталь.

Задание III-72 Найти напряженность магнитного поля в воздушном зазоре тороида длиной по средней линии 1 м; величиной сечения 10 см, изготовленного из пермаллоя. Ток обмотки 5 А.

Задание III-73 Определить, как изменятся потери на гистерезис, если заменить сталь 2313 на сталь 3415?

Задание III-74. Сколько грамм чистого железа содержится в 300 граммах карбонильного железа?

Задание III-75. Постройте кривую изменения потерь на гистерезис для пермаллового сердечника 45Н с изменением частоты от 20 до 400 Гц.

Задание III-76. Магнит из сплава ЮНД4 имеет воздушный зазор между полюсами. Определить максимальную энергию, заключенную в единице объема воздушного зазора.

Задание III-77. При исследовании термомагнитного сплава Ni-Cu был получен график зависимости индукции сплава от температуры. Рассчитать потери на вихревые токи при $t = 40^{\circ}C$, при стандартной частоте, сплава занимавшего объем 0,4 м.

Задание III-78. Определить относительную магнитную проницаемость электротехнической стали 1411 при напряженности поля $H_1=20$ А/см;

$H_2=120\text{A/см};$

$H_1=200\text{A/см}.$

Определить изменения относительной магнитной проницаемости при насыщении.

Задание III-79 Определить коэффициент выпуклости кривой размагничивания для магнитотвердого феррита 2БА1.

Задание III-80 Опишите ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Выберите среди них марку с минимальным удельным электрическим сопротивлением и постройте для нее петлю гистерезиса.

Список рекомендуемой литературы

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В, Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с., ил.
2. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учеб.для вузов. В 2 т. / А.В.Шишкин, В.С.Чередниченко, А.Н.Черепанов, В.В.Марусин; под ред. В.С.Чередниченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Т.1. Элементы теоретических основ материаловедения и технологии получения материалов. – 448 с.
3. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учеб.для вузов. В 2 т. / А.В.Шишкин, В.С.Чередниченко, А.Н.Черепанов, В.В.Марусин; под ред. В.С.Чередниченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Т.2. Технология получения и обработки материалов. Материалы как компоненты оборудования. – 508 с.
4. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М.Прохоров. Ред.кол. Д.М.Алексеев, А.М.Бонч-Бруевич, АС.Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
5. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
6. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1/ Под ред. Ю.В.Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.: ил.
7. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.2/ Под редакцией Ю.В.Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.: ил.
8. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Т.3. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 728 с.: ил.
9. **Материаловедение.** Технология конструкционных материалов: Сборник практических заданий / Коробейников С.М., Нестеров С.В., Целебровский Ю.В., Черненко Н.А., под ред. Ю.В.Целебровского. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008 – 102 стр.

Содержание

<i>Введение</i>	3
------------------------	---

Часть первая. Теория

1. Диэлектрические материалы	9
2. Полупроводники	110
3. Проводниковые материалы	126
4. Магнитные материалы	146

Часть вторая. Лабораторные работы

1. Исследование электрической прочности воздушных промежутков при постоянном напряжении	182
2. Исследование электрической прочности воздушных промежутков в переменном напряжении	192
3. Эффект полярности и влияния барьеров на электрическую прочность воздушных промежутков на постоянном напряжении	197
4. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков	203
5. Определение электрической прочности жидких диэлектриков	212

Часть вторая Задачи для самостоятельной работы

1. Электрическая прочность диэлектриков. Диэлектрические потери Основные расчетные выражения и необходимые пояснения	220
Пример выполнения задания	228
Тексты заданий	238
2. Электропроводность. Проводниковые, полупроводящие и изоляционные материалы Основные расчетные выражения и необходимые пояснения	253
Пример выполнения 2-го задания	258

Тексты заданий	261
3. Магнитные свойства материалов. Магнитные материалы	
Основныe расчетные выражения и необходимые пояснения	276
Пример выполнения 3-го задания	280
Тексты заданий	283
Список рекомендуемой литературы	297