ФГОУ ВПО «НОВОСИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

ВОДНОГО ТРАНСПОРТА»

Тобольский филиал

Кафедра «Электротехники и электрооборудования»

Дисциплина **«**Технология конструкционных материалов**»**

РЕФЕРАТ

На тему:

**«**Технология конструкционных электротехнических материалов**»**

**Вариант 17**

Факультет: Заочный

Группа:

Шифр: 08-117

Выполнил:

Преподаватель:

д-р техн.наук, профессор

**Содержание**

Введение………………………………………………………………………………………3

1. Конструкция и область применения различных типов кабеля (вопрос 18)………4
2. Тепловой пробой твердых диэлектриков (вопрос 28)……………………………...9
3. Зависимость пробивного напряжения в твердом диэлектрике от температуры

и частоты (вопрос 30)……………………………………………………………….13

1. Нагревостойкость твердых и жидких диэлектриков (вопрос 12)………………..15
2. Основные физико-химические характеристики проводниковых материалов

(вопрос 16)…………………………………………………………………………..16

1. Классификация магнитных материалов и требования к ним (вопрос 22)………27
2. Основные виды поляризации (вопрос 4)………………………………………….36
3. Сверхпроводники и возможности их применения в электротехнике

(вопрос 20)………………………………………………………………………..…41

1. Векторное изображение электрических величин (тока, напряжения, ЭДС). Примечание комплексных чисел для расчета электрических цепей. Представление синусоидальных э.д.с., напряжений и токов комплексными числами…………………………………………………………………………….51

Ответы на письма в редакцию……………………………………………………………57 Заключение…………………………………………………………………………………59

Список реферативно использованной литературы………………………………………60

**Введение**

Конструкционные материалы являются основными видами электротехнических материалов с которыми придется встретиться на практике будущим инженерам-электрикам. Эти материалы служат в качестве изоляции токоведущих частей энергооборудования. Они включают в себя такие разнообразные типы электрической изоляции как: воздух в линиях электропередач и электроаппаратах; нефтяные и искусственные масла в трансформаторах, кабелях и конденсаторах; твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий (ВЛ), конденсаторах, установочных изделиях и корпусах аппаратов и т.п.

При этом физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид, тип используемых электротехнических материалов.

Кроме того, при конструировании даже простейших изделий, предназначенных для работы в электрическом поле, необходимо четко представлять, какие процессы происходят в материале, как влияет тот, или иной материал на работу других частей устройства, в том числе за счет перераспределения электрического поля. Здесь необходимо учитывать разноплановые характеристики материала - механические характеристики: плотность и вес материала, прочность на сжатие, разрыв или изгиб; теплофизические характеристики: теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость, теплостойкость и горючесть; электрофизические характеристики: диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность, трекингостойкость; физико-химические характеристики: химическая стойкость, влагопроницаемость и т.д.

Зачастую всем требованиям невозможно удовлетворить, поэтому необходимо ясное понимание всего комплекса процессов, происходящих при функционировании устройств, чтобы оценить значимость каждого из требований и понять, какие их них, в каждом конкретном случае, являются главными, а какие - второстепенными и ими можно пренебречь [17].

**1 Электротехнические угли. Щетки, их характеристики и марки (вопрос 17)**

Основными элементами всех типов кабелей, проводов и шнуров являются токопроводящие жилы, изоляция, экраны, оболочка и наружные покровы. Неизолированные провода изоляции не имеют. В зависимости от назначения и условий эксплуатации кабелей и проводов экран и наружные покровы могут отсутствовать.

***Кабель*** - одна или более изолированных жил (проводников), заключенных, как правило, в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может накладываться защитный покров, в состав которого может входить броня.

***Провод***- одна неизолированная или одна и более изолированные жилы, поверх которых в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может быть неметаллическая оболочка, обмотка и (или) оплетка волокнистыми материалами или проволокой.

***Шнур*** - гибкий кабель с ограниченным числом токопроводящих жил небольшого сечения [14].

**Токопроводящие жилы**

Несмотря на большое многообразие конструкций кабельных жил и применяемых проводниковых материалов, для кабелей и проводов общего применения разработан ряд типовых конструкций медных и алюминиевых токопроводящих жил стандартных рядов сечений, требования к которым приведены в ГОСТ 22483-77.

**Изоляция кабелей, проводов и шнуров**

Для кабелей и проводов применяют резиновую, пластмассовую, пропитанную бумажную, фторопластовую и другие виды изоляции.

***Резиновая изоляция*** изготавливается на основе натуральных или синтетических каучуков. Используются следующие типы установленных ГОСТом изоляционных резин: РТП-0, РТИ-1, РТИ-2, РНИ, классифицируемые в зависимости от содержания каучука. На основе каучука и кремнийорганических спиртов производится кремнийорганическая резина, обладающая более высокими электрофизическими свойствами. Например, она длительно устойчива к воздействию температур в диапазоне от -60 до +200º С.

Толщина резиновой изоляции составляет 1 мм у жил небольшого сечения (площадью до 1,5 мм2) и 3 мм у жил большого диаметра.

***Изоляция из поливинилхлоридного пластиката (ПВХ)*** представляют собой смеси из поливинилхлорида с пластификаторами, стабилизаторами и иными добавками, которые придают ПВХ пластикатам эластичность, облегчают его обработку, однако ухудшают его электроизоляционные свойства, нагревостойкость, химическую стойкость. Он не поддерживает горения, весьма устойчив у воздействию воды, нефтепродуктов , кислот и щелочей. Однако при увеличении температуры от 20 до 70º С его удельное электрическое сопротивление уменьшается в 100 раз, поэтому кабели марки КОВЭ с изоляцией из поливинилхлоридного пластика изготовляют только напряжение до 220В. ПВХ пластикаты выпускают в соответствии с ГОСТ 5960-72.

***Полиэтиленовая изоляция*** изготавливается на основе полиэтиленов низкой и высокой плотности. Полиэтилен низкой плотности получают полимеризацией этилена при высоком давлении, а полиэтилен высокой плотности — при низком давлении с применением металлоорганических катализаторов. Недостатком полиэтилена является способность разрушатся с течением времени при наличии надреза на его поверхности, а также под действием света.

***Изоляция из фторопласта (политетрафторэтилена)*** обладает высокими механическими и диэлектрическими свойствами. Фторопласт используется в диапазоне температур от -90 до +250º С. Фторопласт исключительно стоек к большинству химических веществ.

***Изоляционная резина на основе бутилкаучука*** по сравнению с резиной типа РТИ-1 обладает большим сопротивлением тепловому строению, большой стойкостью к действию влаги, кислот и щелочей. Кабели с такой изоляцией допускают нагрев до 85 º С и имеют более стабильные электроизоляционные свойства в широком диапазоне температур.

***Изоляция из кремнийорганической резины*** длительно устойчива против воздействия температур от -60 до +200º С. Её механические и электрические характеристики выше, чем у резины типа РТИ-1, и стабильнее при изменении температуры. Поэтому такую изоляцию применяют для нагревостойких проводов, а так же для некоторых монтажных кабелей и проводов [14].

**Оболочки**

Для защиты изоляции жил от воздействия света, влаги, различных химических веществ, а также для предохранения её от механических повреждений кабель снабжают оболочками. Наиболее распространены металлические оболочки из алюминия, свинца и стали.

***Алюминиевые оболочки*** - выполняются гладкими и гофрированными. На поверхности оболочки не допускается риски, вмятины, раковины, посторонние включения. Допускается пайка дефектов на строительной длине кабеля не более чем в трех местах. Алюминиевые оболочки в 2-2,5 раза прочнее свинцовых и имеют повышенную вибростойкость. Их могут использовать в качестве экранов для защиты кабелей от внешних электрических влияний.

***Свинцовые оболочки*** уступают алюминиевым и по герметичности, и по механической прочности, и по стойкости к вибрации, и по весу. Однако они имеют существенное преимущество по отношению к алюминиевым: высокая стойкость в условиях воздействия агрессивных сред (пары щелочи, концентрированные щелочные растворы).

***Кабели с невлагоемкой (пластмассовой или резиновой) изоляцией*** не нуждаются в металлической оболочке и поэтому их изготавливают в пластмассовой или резиновой оболочке.

Широкое применение имеют также комбинированные - ***металлопластмассовые оболочки (оболочки из полиэтилена с алюминиевыми и стальными лентами),*** заменяющие свинцовые оболочки.

**Защитные покрытия**

Кабели в металлических и неметаллических оболочках в зависимости от условий монтажа и эксплуатации изготавливаются с небронированными и бронированными стальными лентами или с оцинкованными стальными проволоками с различными наружными защитными покровами. Защитный покров кабелей состоит из подушки, брони и наружного покрова.

***Подушка*** — предназначена для предохранения его оболочки от повреждения

стальными лентами или проволоками и защиты её от коррозии.

***Броня*** - предназначена для предохранения кабелей от механических повреждений

(от поедания животными).

***Наружный покров*** - предназначены для предохранения кабелей от проникновения влаги и от механических повреждений.

Защитные покровы могут быть пластмассовые, волокнистые наружные и легкие защитные покрытия.

Кабели, провода и шнуры с резиновой изоляцией для предохранения изоляции от воздействия света и нефтяных продуктов оплетают хлопчатобумажной изоляцией.

Гибкие шнуры оплетают швейной ниткой в три сложения или глянцевой пряжей темных цветов или комбинированной из двух цветов. В зависимости от условий эксплуатации оплетка хлопчатобумажной пряжей может быть пропитана атмосферостойкими или противогнилостными составами.

Провода с резиновой изоляцией для защиты от воздействия масла, бензина и других растворителей, а также озона применяют с покрытием оплетки проводов лаками на основе эфиров целлюлозы. Для защиты хлопчатобумажной пряжи от плесневых грибов лаки применяют с антисептиком оксидефинилом или соединениями фенола[14].

На рисунке 1.1 показаны типичные конструкции силовых кабелей. Силовые кабели состоят из следующих основных элементов: токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов. Помимо основных элементов в конструкцию силовых кабелей могут входить экраны, нулевые жилы, жилы защитного заземления и заполнители.

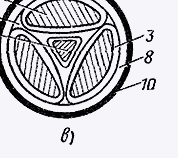
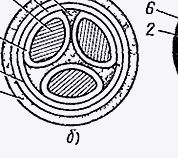
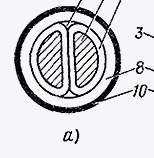
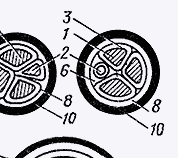
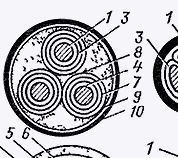
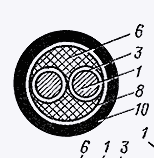


Рисунок 1.1 - Сечения силовых кабелей : а) - двужильные силовые кабели с круглыми и сегментными жидами;

б) - трехжильные силовые кабели с поясной изоляцией и с отдельными оболочками;

в) - четырехжильные силовые кабели с нулевой жилой секторной, круглой и треугольной формы

1 - токопроводящая жила;2 - нулевая жила;3 - изоляция жилы;4 - экран на токопроводящей жиле

5 - поясная изоляция;6 – заполнитель;7 - экран на изоляции жилы;8 – оболочка;9 - бронепокров

10 - наружный защитный покров.

Токопроводящие жилы предназначены для прохождения электрического тока, они бывают основными и нулевыми. Основные жилы применяются для выполнения основной функции силового кабеля- передачи по ним электроэнергии. Нулевые жилы предназначены для протекания разности токов фаз (полюсов) при неравномерной их нагрузке. Они присоединяются к нейтрале источника тока.

Жилы защитного заземления являются вспомогательными жилами силового кабеля и предназначены для соединения не находящихся под рабочим напряжением металлических частей электроустановки, к которой подключен силовой кабель, с контуром защитного заземления источника тока.

Изоляция служит для обеспечения необходимой электрической прочности токопроводящих жил силового кабеля по отношению друг к другу и к заземленной оболочке (земле).

Экраны используются для защиты внешних цепей от влияния электромагнитных полей токов, протекающих по силовому кабелю, и для обеспечения симметрии электрического поля вокруг жил кабеля.

Заполнители предназначены для устранения свободных промежутков между конструктивными элементами силового кабеля в целях герметизации, придания необходимой формы и механической устойчивости конструкции кабеля.

Оболочки защищают внутренние элементы кабеля от увлажнения и других внешних воздействий.

Защитные покровы предназначены для защиты оболочки силового кабеля от внешних воздействий. В зависимости от конструкции кабеля в защитные покровы входят подушка, бронепокров и наружный покров[15].

Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена и оболочкой из полиэтилена показаны на рисунке 1.2

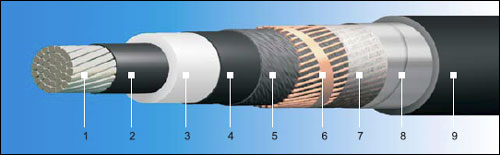


Рисунок 1.2 - Конструкция кабеля типа ПвПг

1- Токопроводящая медная жила; 2- Полупроводящий слой по жиле; 3- Изоляция; 4-Полупроводящий слой по изоляции; 5-Водонабухающая полупроводящая лента; 6- Экран из медных проволок; 7- Медная лента; 8-Водонабухающая лента; 9 - Оболочка из полиэтилена.

Таблица 1.1 Марки, элементы конструкции и области применения

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка кабеля | Материал жил | Оболочка | Герметизация | Область применения |
| АПвП | Алюминий | П | нет | Прокладка в земле и на воздухе при условии обеспечения мер противопожарной защиты |
| ПвП | Медь | П | нет | То же |
| АПвПу | Алюминий | Пу | нет | То же на сложных участках трасс |
| ПвПу | Медь | Пу | нет | Тоже |
| АПвПг | Алюминий | П | г | Для прокладки в грунтах с повышенной влажностью и в сырых, частично затапливаемых помещениях |
| ПвПг | Медь | П | г | То же |
| АПвП2г | Алюминий | П | 2г | Тоже |
| ПвП2г | Медь | П | 2г | То же |
| АПвВ | Алюминий | В | нет | Для прокладки в кабельных сооружениях и производственных помещениях и в сухих грунтах |
| ПвВ | Медь | В | нет | То же |
| АПвВнг | Алюминий | Внг | нет | То же для групповой прокладки |
| ПвВнг | Медь | Внг | нет | Тоже |

Типы оболочек: П - оболочка из полиэтилена; Пу - оболочка из полиэтилена, усиленная ребрами жесткости; В - оболочка из ПВХ-пластиката; Внг - оболочка из ПВХ-пластиката пониженной горючести. Типы герметизации:  
г - продольная герметизация экрана водонабухающими лентами;  
2г - поперечная герметизация алюминиевой лентой, сваренной с оболочкой, в сочетании с продольной герметизацией водонабухающими лентами.

**2 Тепловой пробой твердых диэлектриков (вопрос 28)**  У твердых диэлектриков могут наблюдаться три основных механизма пробоя:

1. электрический;

2. тепловой;

3. электрохимический.

Каждый из указанных механизмов пробоя может иметь место в одном и том же материале в зависимости от характера электрического поля, в котором он находится – постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты; времени воздействия напряжения; наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор; толщины материала; условий охлаждения и т. д. [2, С.198].

**Тепловой пробой** связан с разогревом диэлектрика вследствие выделяемой в нем энергии при приложении на­пряжения. Если с повышением температуры выделяемая энергия увеличивается, то при некотором напряжении, называемом напряжением теплового пробоя, тепловыделение в диэлектрике превысит теплоотдачу в окружающую среду. Это обусловливает непрерывный рост температуры во вре­мени и разрушение диэлектрика [2, С.198].

Для загрязненных либо недостаточно очищенных диэлектриков, а также для полупроводников и резистивных материалов механизм пробоя связан с процессами электропроводности и нагревания материалов. **Тепловой пробой** – **разрушение диэлектрика за счет прогрессирующего локального энерговыделения при протекании тока в среде.** Тепловой пробой возника­ет вследствие положительного температурного коэффициента электропровод­ности диэлектриков, т.е. увеличения электропроводности диэлектрика с рос­том температуры. Эту зависимость обычно представляют в виде

, (2.1)

где *а* – температурный коэффициент зависимости;  – начальная температура;  – электропроводность при начальной температуре.

Механизм возникновения пробоя представляется следующим образом.

Приложенное напряжение вызывает потери энергии в диэлектрике; при постоянном напряжении они определя­ются удельной проводимостью диэлектрика **γ**, а при переменном – тангенсом угла диэлектрических потерь **tgδ** . Так как с повышени­ем температуры величины **γ**, а в об­ласти повышенных температур – и величины **tgδ** растут, то при некотором напряжении возможно возникновение неустойчивого теплового состояния диэлектрика. В этом случае увеличение **γ** или **tgδ** с повышением температуры, в свою очередь, приводит к увеличению вы­деляемых в диэлектрике потерь и к дальнейшему росту температуры; это заканчивается тепловым разрушением диэлектрика.

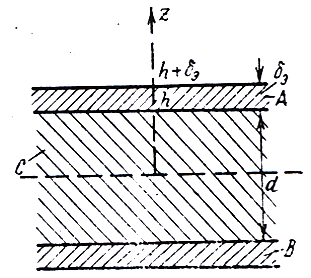


Рисунок 2.1 – Схема диэлектрика к расчёту теплового пробоя:

А, В – электроды; С – диэлектрик

Рассмотрим слой однородного диэлектрика с толщиной  = d, находящийся между бесконечными плоскими элек­тродами (рисунок 2.1). Составим дифференциальное уравнение, соответствующее равновесномусостоянию системы. В дан­ном случае из соображений симметрии принимаем плоскопараллельное тепловое поле с градиентом температуры по оси **z**. Поток тепла, входящий за 1 с в параллельный электро­дам слой диэлектрика толщиной **dz** и площадью 1 см2, бу­дет меньше потока, выходящего из слоя, на количество теп­ла, выделяющегося ежесекундно в этом слое вследствие ди­электрических потерь

, (2.2)

где k – коэффициент теплопроводности диэлектрика; ****– эквивалентная удельная проводимость диэлектрика. Для переменного напряжения

 (2.3)

где – относительная диэлектрическая проницаемость; – частота приложенного напряжения.

Напряженность теплового пробоя изменяется обратно пропорционально **d**.

С учетом связи между и **tgδ** по уравнению (2.3) имеем

 (2.4)

где k – в кал/с град см; – в вольтах.

Приведенные выше формулы получены в предположении, что в диэлектрике при его разогреве величина напряженности поля не зависит от координаты **z**. Это допущение можно считать справедливым при переменном напряжении, для ко­торого, если пренебречь током проводимости

 (2.5)

Величина  для большинства технических диэлектриков сла­бо зависит от температуры при не очень высоких частотах. При постоянном напряжении

 (2.6)

и вследствие зависимости  от  имеет место существенная зависимость Е от z, причем слои диэлектрика, ближайшие к электродам, нагружаются сильнее, чем центральные.

В этом случае напряженность и напряжение теплового пробоя определяются формулами, аналогичными (2.4 и (2.5), в которых изменяется только функция 

 (2.7)

 (2.8)

При **d** → ∞ и **c** → ∞ **ϕ1(с)** → 1,0. Повышение пробивных напряжений для постоянного напряжения при тех же **d** и объясняется уменьшением напряженности в центральной части диэлектрика, т. е. в области наибольших температур, и затруднением развития теплового пробоя.

При малых толщинах диэлектрика  на основании (2.7) и (2.8), пробивное напряжение пропорционально , а пробивная напряженность – обратно пропорциональна. Термическое разрушение диэлектрика может происходить и без неограниченного роста температуры. В стационарном состоянии, когда количество тепла, выделяемого в диэлек­трике за счет потерь, равно количеству тепла, отводимого через электроды, установившаяся температура может ока­заться слишком высокой. Разрушение в этом случае может наступить в результате оплавления, обугливания и подобных процессов, вызванных диэлектрическим нагревом. Это явление называют **тепловым пробоем второго рода** [2, С.204].

**3 Зависимость пробивного напряжения в твердом диэлектрике**

**от температуры и частоты (вопрос 30)**

Исследования пробоя твердых диэлектриков по своему объему значительно превышают исследования всех других видов диэлектриков, что обусловлено более широким применением твердых диэлектриков. Это, в свою очередь, обусловлено их высокими электрическими характеристиками в сочетании с удовлетворительными механическими и теплофизическими характеристиками. Механизм пробоя значительно отличается для разных диэлектриков и даже для одного и того же диэлектрика при разных условиях [16].

Закономерности пробоя твердых диэлектриков:

**Температурная зависимость**. Эта зависимость зачастую имеет достаточно сложный вид. Например в некоторых случаях электрическая прочность с ростом температуры сначала увеличивается затем уменьшается, в других случаях монотонно возрастает или убывает. Последний случай обычно хорошо описывается **моделью теплового пробоя**.

Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой поля, условиями охлаждения диэлектрика, температурой окружающей среды; оно зависит также от нагревостойкости материала. С повышением температуры электрическая прочность уменьшается.

Для однородных плоских диэлектриков, обладающих потерями, существует приближенный метод расчета пробивного напряжения.

Для расчета U пр полагаем, что пробой происходит при повышенных температурах и в диэлектрике преобладают потери от сквозной электропроводности. Таким образом, учитывая экспоненциальную зависимость тангенса потерь (tg δ) от температуры и используя выражение Ра = U ω С-tgδ, после преобразований получим

*Pа = U2 f ε S tgδ eα(t – t0) / (1,8 1010 h),* (3.1)

где U - приложенное напряжение; f - частота; ε. - диэлектрическая проницаемость материала; S - площадь электрода; tg δ - тангенс угла потерь диэлектрика при t 0 - температуре окружающей среды; α- температурный коэффициент тангенса угла потерь; t - температура нагретого за счет диэлектрических потерь материала; t 0 - температура электродов, приблизительно равная температуре окружающей среды; h - толщина диэлектрика.

Теплопроводность материала электродов обычно на два - три порядка больше, чем теплопроводность диэлектрика, поэтому полагаем, что теплота из нагревающегося объема диэлектрика передается в окружающую среду через электроды. Мощность, отводимая от диэлектрика, выражается формулой Ньютона

*Ра = 2 σ S (t - t0 ).* (3.2)

где σ - коэффициент теплопередачи системы диэлектрик - металл электродов.

Для наглядности дальнейших рассуждений воспользуемся графическим построением, показанным на рисунок 3.1, где в выбранной системе координат изображены экспоненты тепловыделения при различных значениях приложенного напряжения и прямая теплопередачи [16].

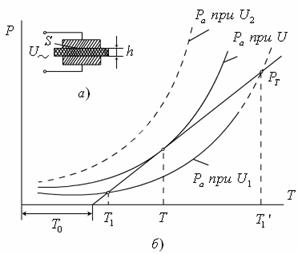


Рисунок 3.1 - Пробивное напряжение при тепловом факторе

На рисунке 3.1 изображены: прямая теплопередачи Рт = F(t); экспоненты тепловыделения для трех различных значений приложенного напряжения. При значении напряжения U 1, прямая теплопередачи является секущей кривой тепловыделения, и, следовательно, диэлектрик нагреется до температуры t 1температуры состояния устойчивого равновесия. Напряжение U1 будет неопасным для образца, если нагрев до этой температуры не приведет к механическому и ш химическому разрушению структуры материала образца. Поэтому увеличим напряжение до значения U 1, при котором кривая тепловыделения станет касательной к прямой теплопередачи, что приведет к состоянию неустойчивого теплового равновесия при температуре t. При значении напряжения U 2 кривая тепловыделения пройдет выше прямой теплопередачи, а это означает отсутствие теплового равновесия, т.е. температура будет возрастать до разрушения диэлектрика - до теплового пробоя.



Таким образом, напряжение U , при котором имеет место неустойчивый режим - граничный режим, можно принять за напряжение пробоя U пр.

Его значение можно определить по двум условиям

Ра = Рt, (3.3)

dPa / dt = dP t / dt (3.4)

Решая эти два уравнения относительно Ui с учетом выше обозначенных значений для Ра и Рt, получаем

U2 f ε tgδ S eα(t – t0) / (1,8 1010 h) = 2 σ S (t – t0), (3.5)

U2 f ε tgδ S eα(t – t0) / (1,8 1010 h) = 2 σ S (3.6)

Разделив эти два выражения, получим 1 / α = t – t 0, тогда, подставив его в

последнее выражение и решив его относительно U, получим

U2пр = 1,8 1010 2 σ h / (f ε tgδ α) (3.7)

или

Uпр = К ( σ h / (f ε tgδ α)1/2, (3.8)

где К – числовой коэффициент, равный 1,15 10 5, если все величины выражены в единицах системы СИ.

Отсюда следует, что пробивное напряжение будет выше ( изменяется по закону экспоненты), если диэлектрик будет толще, условия теплоотвода лучше (σ больше), частота ниже, а ε и tgδ меньше. При больших ε, tgδ и при высоких частотах, а также при большом температурном коэффициенте тангенса угла потерь пробивное напряжение будет ниже.

Этот расчет, пригодный только для одномерного потока теплоты, называется **графоаналитическим и** является приближенным, В нем не учтены перепад температуры по толщине диэлектрика (искажение электрического поля и повышение градиента напряжения в поверхностных слоях), а также теплопроводность материала электродов. Поэтому тепловой пробой часто наступает при напряжении ниже расчетного. Более точные методы расчета разработаны академиками Н.Н. Семеновым и ВА. Фоком только для изделий простейшей конфигурации [16].

**4 Нагревостойкость твердых и жидких диэлектриков (вопрос 12)**

Общефизические характеристики, такие как плотность материала, геометрические размеры, пористость, вязкость, влагостойкость и др., нор­мируются для каждого вида материала и, сле­довательно, подлежат определению при его ис­пытании. Кроме того, при определении других характеристик (механических, электрических) часто требуется знать вышеуказанные параметры с некоторой допускаемой погрешностью [2, С.204].

**Нагревостойкость** – это способность электроизоляционного ма­териала длительно выдерживать предельно допустимую температуру. Для электроизоляционных материалов, применяемых в элек­трических машинах и аппаратах, установлено семь классов нагревостойкости (таблица 4.1).

Таблица 4.1 − Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

|  |  |
| --- | --- |
| Класс нагревостойкости | Предельно допустимая  рабочая температура, °С |
| Y………………………………….... | 90 |
| A…………………………………… | 105 |
| E……………………………………. | 120 |
| B…………………………………..... | 130 |
| F……………………………………. | 155 |
| H……………………………………. | 180 |
| C……………………………………. | выше 180 |

К классу ***Y***относятся органические диэлектрики: полистирол, полиэтилен, волокнистые непропитанные материалы на ос­нове целлюлозы, картон, бумаги, хлопчатобумажные ткани и др.

К классу **А**относятся пропитанные (лаками и другими соста­вами) хлопчатобумажные и шелковые ткани (лакоткани) и бумаги (лакобумаги), а также многие пластмассы – гетинакс, текстолит и др.

В класс ***Е***входят такие материалы, как триацетатцеллюлозные и лавсановые изоляционные пленки, стеклотекстолит на бакелито­вой смоле и др.

В класс ***В***входят все клееные слюдяные материалы, в которых применены клеящие составы класса нагревостойкости *А* или *Е* (шеллачные, бакелитовые смолы, лаки на основе этих смол и высы­хающих растительных масел).

К классу ***F***относятся материалы на основе слюды, асбеста, стек­лянных волокон, склеенных лаками повышенной нагревостойкости (полиуретановыми, эпоксидными и др.).

В класс ***Н***входят кремнийорганические лаки и резины, а также композиционные материалы, состоящие из слюды, стеклянных воло­кон, асбеста, склеенных при помощи кремнийорганических смол и лаков, отличающихся повышенной стойкостью к теплу.

Класс **С** составляют преимущественно диэлектрики неорганиче­ского происхождения (электрокерамика, стекло, микалекс, асбест и др.). Из органических высокополимерных диэлектриков в этот класс входит политетрафторэтилен (фторопласт-4) [2, С.213].

1. **Основные физико-химические характеристики**

**проводниковых материалов (вопрос 16)**

Проводниковые материалы в основном служат для передачи электрической энергии и ее непосредственного преобразования в тепловую, механическую и другие виды энергии. Проводниками могут служить твердые тела, жидкости и газы. Твердыми проводниками являются металлы, различного рода сплавы, модификации углерода и композиции на их основе. К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Большинство металлов являются жидкими проводниками лишь при повышенных температурах [2, С.39].

Электролитами являются водные растворы кислот, солей, щелочей и расплавы ионных соединений.

Все газы и пары металлов становятся проводниками при высокой напряженности приложенного электрического поля. Основным условием при этом является возникновение ударной или фотоионизации и газ может стать проводником с электронной и ионной электропроводимостью. При равенстве количества положительных и отрицательных заряженных частиц в объеме сильно ионизированного газа получают равновесную проводящую среду так называемого четвертого состояния вещества – плазму.

К основным характеристикам проводниковых материалов относятся: удельное сопротивление и удельная проводимость; температурный коэффициент удельного электрического сопротивления; термоэлектродвижущая сила (термоэдс); теплопроводность; теплостойкость; предел прочности на разрыв и относительное удлинение при разрыве (рисунок 5.1).

Знание этих характеристик позволяет оценить электрические, тепловые и механические свойства проводникового материала.

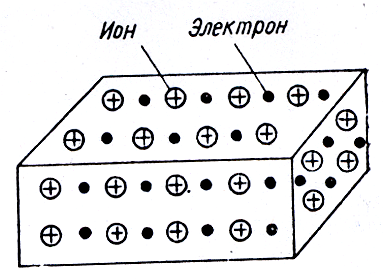


Рисунок 5.1 – Схема строения металлического проводника

**Удельное сопротивление материала ρ** является основ­ной величиной, характеризующей материал проводника. Для измерения удельного сопротивления проводников обычно поль­зуются образцами, изготовленными из исследуемого материала в виде отрезков проводов неизменного сечения. В этом случае, зная сопротивление R, площадь поперечного сечения S и длину *l* образца, удельное сопротивление материала можно вычис­лить, исходя из следующего известного соотношения

, т.е. . (5.1)

В Международной системе единиц (СИ) ρ измеряют в ом­метрах (Ом⋅м). Однако на практике для оценки удельного со­противления проводников широко пользуются внесистемной единицей Ом·мм2/м, связанной с единицей СИ соотношением 1 Ом-мм2/м = 10-6 Ом⋅м = 1 мкОм⋅м

Удельное сопротивление проводников находится в пределах от 0,016 для серебра до 1,6 мкОм-м для фехралей (жаропроч­ных сплавов на железохромовой основе), т. е. имеет диапазон в два порядка.

Часто применяется величина, обратная удельному сопротивлению и носящая название удель­ной проводимости, которая равна

. (5.2)

Так как величина, обратная электрическому сопротивлению и называемая проводимостью, измеряется в единицах Си в сименсах (1/Ом = 1 См), то единица удельной проводимости равна 1 См/м.

Удельное сопротивление (а следовательно, и удельная проводимость) в основном зависят от средней длины свободного пробега электрона в данном проводнике, которая, в свою очередь, зависит от строения материала проводника. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления, а примеси, искажая решетку, приводят к увеличению его. Даже небольшое наличие примеси (приблизительно 0,5 %) приводит к увеличению ρ на 555 %.

Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют твердый раствор, т. е. образуют при затвердевании совместную кристаллизацию и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого [2, С.57].

Повышенная электропроводность проводниковых материалов обусловлена большим количеством обобществленных электронов, которые классической электронной теорией металлов рассматриваются как электронный газ .

В соответствии с этими представлениями свободные электроны находятся в состоянии хаотического теплового дви­жения со средней скоростью *и*, сталкиваясь с колеблющимися атомами кристал­лической решетки. Среднее расстояние *l*, проходимое электроном между двумя столкновениями, называют длиной свободного пробега, средний промежуток вре­мени между двумя столкновениями – временем свободного пробега. Время свобод­ного пробега вычисляется по формуле

. (5.3)

Средняя кинетическая энергия электронов, находящихся в непрерывном хаоти­ческом движении, линейно зависит от температуры

, (5.4)

где Дж/К – постоянная Больцмана. Температуре T= 300 К соответ­ствует  м/с.

Распределение электронов по энергетическим состояниям, характеризуемое ве­роятностью р (Е), подчиняется статистике Максвелла – Больцмана и описывает­ся экспоненциальной функцией

. (5.5)

При этом считается, что в каждом энергетическом состоянии может находиться любое число электронов, а при температуре абсолютного нуля энергия всех сво­бодных электронов равна нулю.

Если в проводнике существует электрическое поле, то под действием этого поля элек­троны приобретают ускорение, пропорциональное напряженности поля Е, в резуль­тате чего возникает направленное движение электронов со средней скоростью

. (5.6)

Такое направленное движение называют дрейфом электронов, оно накладывает­ся на хаотическое движение электронов. Скорость дрейфа значительно меньше скорости теплового движения. Направленное движение электронов создает ток, плотность которого равна

 , (5.7)

где n – концентрация электронов.

Этот ток пропорционален напряженности поля, коэффициентом пропорциональ­ности является удельная электрическая проводимость

 . (5.8)

Классическая теория, давая в целом правильное представление о механизме элект­ропроводности, не учитывает распределение электронов по энергетическим со­стояниям. Поэтому она не может объяснить ряд противоречий теории с опытны­ми данными, в частности, классическая теория не в состоянии объяснить низкую теплоемкость электронного газа. Более полное представление о процессах, происходящих внутри вещества, дает современная квантовая физика [2, С.58].

Электропроводность создается свободными электронами, способными покинуть атомы. Такой способностью обладают только валентные электроны. Поэтому в дальнейшем речь пойдет только об электронах, находящихся на энергетических уровнях валентной зоны.

Квантовая физика исходит из того, что электроны могут находиться на строго определенных энергетических уровнях, энергетическая плотность которых вблизи границ энергетических зон изменяется по параболическому закону (рисунок 5.2 а)

, (5.9)

где  – эффективная масса электрона, учитывающая взаимодействие электро­на с периодическим полем кристаллической решетки, то есть это масса свободно­го электрона, который под действием внешней силы смог бы приобрести такое же ускорение, как и электрон в кристалле под действием той же силы.

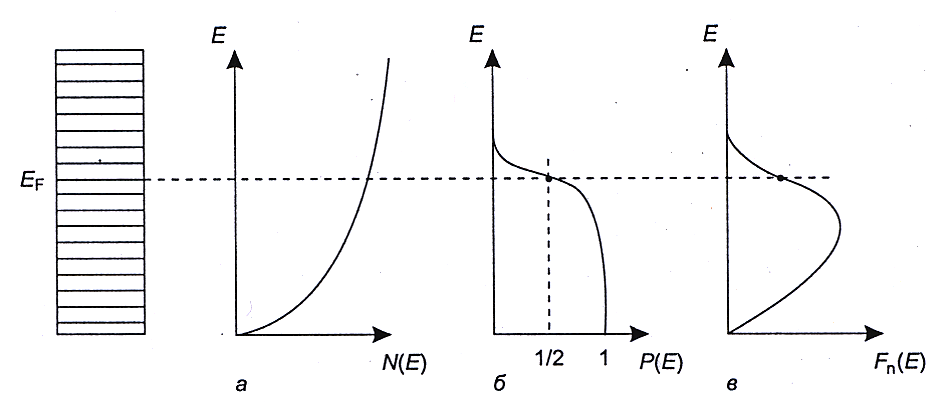


Рисунок 5.2 – Энергетическая плотность энергетических уровней электронов

В соответствии с принципом Паули на каждом энергетическом уровне могут нахо­диться два электрона с противоположными спинами. Если концентрация свобод­ных электронов равна n, то при температуре абсолютного нуля они займут n/2 самых низких энергетических уровней. Наиболее высокий из занятых уровней называется уровнем Ферми и обозначается Ет. При нагреве кристалла электронам сообщается тепловая энергия порядка kT, вследствие чего некоторые электроны, находящиеся вблизи уровня Ферми, переходят на более высокие энергетические уровни. Избыток энергии, получаемый электронами при нагреве проводника, очень незначителен по сравнению с энергией Ферми, при комнатной температу­ре он равен 0,026 эВ (1 эВ = 1,61019 Дж). Поэтому средняя энергия свободных электронов сохраняется практически неизменной, а незначительное изменение средней энергии означает малую теплоемкость электронного газа. В квантовой теории вероятность заполнения энергетических уровней электрона­ми определяется функцией Ферми–Дирака (рисунок 5.2,б)

. (5.10)

Из формулы (5.10) следует, что уровень Ферми представляет собой энергетический уро­вень, вероятность заполнения которого равна 1/2.

Распределение электронов по энергиям (рисунок 5.2, в) определяется энергетической плотностью разрешенных уровней и вероятностью их заполнения

. (5.11)

Концентрация электронов может быть найдена путем интегрирования по всем заполненным состояниям

. (5.12)

Если считать, что атомы в металле ионизированы однократно, то концентрация свободных электронов будет равна концентрации атомов, которая рассчитывает­ся по формуле

, (5.13)

где d – плотность материала;

А – атомная масса;

N0 – число Авогадро (6,02 · 1023 моль-1).

Следовательно, уровень Ферми, отсчитанный от дна валентной зоны, может быть найден из уравнения (5.12)

. (5.14)

Величина энергии Ферми для различных металлов лежит в пределах от 3 до 15 эВ. Если в проводнике создать электрическое поле с напряженностью Ет , то электро­ны, расположенные вблизи уровня Ферми, переходят на более высокие энергети­ческие уровни, приобретая добавочную скорость направленного движения

, (5.15)

где τf – время свободного пробега;

uf – тепловая скорость быстрых электронов, обладающих энергией, близкой к энергии EF.

Электроны, находящиеся на глубинных уровнях, вероятность заполнения кото­рых равна 1, непосредственно реагировать на внешнее поле не могут, так как все ближайшие энергетические уровни заняты. Однако несмотря на это они участву­ют в процессе электропроводности, перемещаясь на более высокие энергетиче­ские уровни по мере их освобождения. Поле начинает влиять на эти электроны тогда, когда они оказываются вблизи уровня Ферми. Таким образом, под действи­ем поля в движение приходит весь «коллектив» электронов. Скорость движения этого «коллектива» определяется скоростью движения электронов, находящихся вблизи уровня Ферми. С учетом этого обстоятельства выражение для плотности тока принимает вид

, (5.16)

где  – удельная электрическая проводимость.

Учтем, что

. (5.17)

Найдем отсюда  и, подставив найденное значение в (5.16), получим

. (5.18)

Концентрация свободных электронов в чистых металлах различается незначи­тельно. Поэтому удельная электрическая проводимость металлов определяется средней длиной свободного пробега электронов, которая зависит от структуры атомов и типа кристаллической решетки [2, С.61].

В чистых металлах с идеальной кристаллической решеткой единственной причи­ной, ограничивающей длину свободного пробега электронов, являются тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки, амплитуда которых возрас­тает с ростом температуры. Интенсивность столкновений электронов с атомами, то есть их рассеяние, прямо пропорциональна поперечному сечению сферическо­го объема, занимаемого колеблющимся атомом, и концентрации атомов. Следо­вательно, длина свободного пробега будет равна

. (5.19)

Потенциальная энергия атома, отклонившегося на величину  от узла кристал­лической решетки, определяется соотношением

. (5.20)

Здесь  – коэффициент упругой связи, которая стремится вернуть атом в по­ложение равновесия.

Поскольку средняя энергия колеблющегося атома равна kТ, то

. (5.21)

Решая (5.21) относительно ()2 и подставляя полученный результат в (5.19), определяем среднюю длину свободного пробега электрона

. (5.22)

Следовательно, удельная электрическая проводимость с ростом температуры уменьшается, а удельное электрическое сопротивление возрастает. Влия­ние температуры на сопротивление проводника оценивают температурным коэф­фициентом удельного сопротивления

. (5.23)

У большинства металлов при комнатной температуре  0,004 К-1. Если в металле имеются примеси, то помимо рассеяния на основных атомах возникает рассея­ние электронов на примесных атомах, в результате чего уменьшается длина сво­бодного пробега, определяемая соотношением

. (5.24)

Здесь  и  характеризуют рассеяние на тепловых колебаниях основных атомов и примесей соответственно.

Этим объясняется то, что чистые металлы имеют более низкое удельное сопротивление по сравнению со сплавами.

На высоких частотах плотность тока изменяется по сечению проводника. Она максимальна на поверхности и убывает по мере проникновения в глубь проводника. Это явление называется поверхностным эффектом.

Неравномерное распределение тока объясняется действием магнитного поля тока, протекающего по проводнику. Магнитный поток, сцепленный с проводом, про­порционален току

Ф = Li, (5.25)

где L – индуктивность проводника.

Если ток изменяется по синусоидальному закону i = Im sin ωt, то изменение магнитного потока вызывает появление ЭДС самоиндукции

. (5.26)

Эта ЭДС имеет направление, противоположное току в проводе, и тормозит его изменение в соответствии с законом Ленца.

При прохождении переменного тока переменное магнитное поле возникает как вокруг проводника, так и внутри него. При этом потокосцепление максимально для внутренних слоев и минимально для внешних. Поэтому ЭДС самоин­дукции оказывается максимальной в центре проводника и уменьшается в направ­лении к поверхности. Соответственно, и плотность тока наиболее значительно ослабляется в центральной части проводника и в меньшей степени – у поверхно­сти, иначе говоря, происходит вытеснение тока к поверхности проводника. Оно тем сильнее, чем выше частота [2, С.63].

Распределение плотности тока по сечению проводника подчиняется экспоненци­альному закону

, (5.27)

где j0 – плотность тока на поверхности;

z – расстояние, измеряемое от поверхности;

Δ – глубина проникновения тока.

Глубина проникновения тока, выраженная в миллиметрах, равна расстоянию, на котором плотность тока уменьшается в е = 2,72 раз по отношению к своему значе­нию на поверхности проводника. Она пропорциональна удельному сопротивлению ρ [Ом·м] и обратно пропорциональна частоте f [МГц]

. (5.28)

В случае сильно выраженного поверхностного эффекта, когда ток протекает по тонкому поверхностному слою, толщина которого много меньше диаметра про­вода d, экспоненциальное распределение тока может быть заменено однородным распределением с постоянной плотностью тока в пределах тонкого слоя толщи­ной Д, на основании чего можно ввести понятие эквивалентной площади сечения проводника, занятой током

. (5.29)

Поскольку площадь сечения, через которое протекает ток, уменьшилась, то сопро­тивление провода переменному току R~ стало больше, чем его сопротивление по­стоянному току R0, что учитывают коэффициентом увеличения сопротивления

. (5.30)

Полученная формула справедлива при Δ « d.

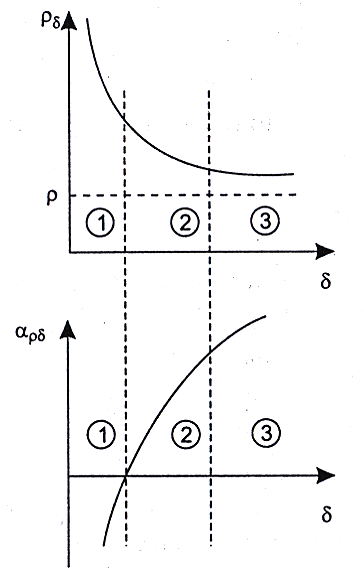
Электрические свойства тонких пленок отличаются от свойств объемных провод­ников. Это объясняется изменением структуры проводящих пленок и, соответ­ственно, механизма перемещения электрических зарядов, создающих электрический ток. На рисунке 5.3 показаны три области, соответствующие трем различным механизмам протекания тока. При напылении пленки сначала образуются отдель­ные разрозненные островки (область 1), переход электронов происходит через узкие диэлектрические зазоры, что обусловлено термоэлектронной эмиссией и туннельным эффектом. В этой области удельное сопротивление очень велико, а температурный коэффициент отрицателен, так как с ростом температуры облегчается переход электронов от островка к островку [2, С.64].

По мере напыления пленки происходит образование проводящих цепочек между отдельными остров­ками и начинает работать обычный механизм электропроводности, удель­ное сопротивление пленки уменьша­ется, а температурный коэффициент становится положительным (область 2). При дальнейшем напылении ос­тровки исчезают и образуется сплошная пленка толщиной около 0,1 мкм (область 3). На этом участке удельное сопротивление выше, чем удельное сопротив­ление монолитного проводника, что объясняется размерным эффектом, суть ко­торого состоит в сокращении длины свободного пробега электронов вследствие их отражения от поверхности пленки. Полагая, что процессы рассеяния элект­ронов в объеме и на поверхности независимы, можно для длины свободного про­бега  электронов в пленке записать

Рисунок 5.3 – Различные

механизмы протекания тока

в тонких плёнках



. (5.31)

Здесь l и ls – длины свободного пробега электронов при рассеянии в объеме и на поверхности.

Приближенно полагая длину свободного пробега при рассеянии на поверхно­сти lS равной толщине пленки δ, получим

. (5.32)

Здесь ρ – удельное электрическое сопротивление монолитного проводника.

Сопротивление пленки определяется по формуле

, (5.33)

где l – длина проводящей пленки;

S – площадь поперечного сечения пленки.

Учитывая, что S = δω,

где ω – ширина пленки, получаем

. (5.34)

Здесь  – удельное поверхностное сопротивление. Величина ρS равна со­противлению пленки при условии l = ω, то есть ρS представляет собой сопротив­ление пленки, имеющей форму квадрата.

Подбором толщины пленки можно изменять величину ρS независимо от удельно­го сопротивления материала.

В микроэлектронике в качестве соединительных пленок применяют пленки из чистого металла, чаще всего алюминия, а в качестве резистивных пленок – туго­плавкие металлы (вольфрам, тантал, рений, хром, молибден) и сплавы никеля с хромом [2, С.65].

**6 Классификация магнитных материалов и требования к ним (вопрос 22)**

Магнитными веществами, или магнетиками, называются вещества, обладающие магнитными свойствами. Под магнитными свойствами понимается способность вещества приобретать магнитный момент, т.е. намагничиваться при воздействии на него магнитного поля. В этом смысле все вещества в природе являются магнетиками, так как при воздействии магнитного поля приобретают определенный магнитный момент. Этот результирующий макроскопический магнитный момент М представляет собой сумму элементарных магнитных моментов mi - атомов данного вещества



(6.1)

Элементарные магнитные моменты могут быть либо наведены магнитным полем, либо существовать в веществе до наложения магнитного поля; в последнем случае магнитное поле вызывает их преимущественную ориентацию [2, С.298].

Магнитные свойства различных материалов объясняются движением электронов в атомах, а также тем, что электроны и атомы имеют постоянные магнитные моменты.

Вращательное движение электронов вокруг ядер атомов аналогично действию некоторого контура электрического тока и создает магнитное поле, которое на достаточном расстоянии представляется как поле магнитного диполя с магнитным моментом, значение которого определяется произведением тока и площади контура, который ток обтекает. Магнитный момент является векторной величиной и направлен от южного полюса к северному. Такой ***магнитный момент*** называется ***орбитальным****.*

Сам электрон имеет магнитный момент, который называется ***спиновым магнитным моментом.***

Атом представляет собой сложную магнитную систему, магнитный момент которой является результирующей всех магнитных моментов электронов, протонов и нейтронов. Так как магнитные моменты протонов и нейтронов существенно меньше, чем магнитные моменты электронов, магнитные свойства атомов по существу определяются магнитными моментами электронов. У имеющих техническое значение материалов это прежде всего спиновые магнитные моменты [2,С.298].

Результирующий магнитный момент атома при этом определяется векторной суммой орбитальных и спиновых магнитных моментов отдельных электронов в электронной оболочке атомов. Эти два вида магнитных моментов могут быть частично или полностью взаимно скомпенсированы.

В соответствии с магнитными свойствами материалы делятся на следующие группы:

а) диамагнитные (**диамагнетики**),

б) парамагнитные (**парамагнетики**),

в) ферромагнитные (**ферромагнетики**),

г) антиферромагнитные (**антиферромагнетики**),

д) ферримагнитные (**ферримагнетики**),

е) метамагнитные (**метамагнетики**).

**А) Диамагнетики**

**Диамагнетизм** проявляется в намагничивании вещества навстречу направлению действующего на него внешнего магнитного поля.

Диамагнетизм свойствен всем веществам. При внесении какого-либо тела в магнитное поле в электронной оболочке каждого его атома, в силу закона электромагнитной индукции, возникают индуцированные круговые то­ки, т. е. добавочное круговое движение электронов вокруг направления магнитного поля. Эти токи создают в каждом атоме индуцированный ***магнитный момент,***направленный, согласно правилу Ленца, навстречу внешнему магнитному полю (независимо от того, имелся ли первоначально у атома собственный магнитный момент или нет и как он был ориентирован). У чисто диамагнитных веществ электронные оболочки атомов (молекул) не обладают постоянным маг­нитным моментом. Магнитные моменты, создаваемые отдельными электронами в таких атомах, в отсутствие внешнего маг­нитного поля взаимно скомпенсированы. В частности, это имеет место в атомах, ионах и молекулах с целиком заполнен­ными электронными оболочками в атомах инертных газов, в молекулах водорода, азота.

Удлинённый образец диамагнетика в однородном магнитном поле ориентиру­ется перпендикулярно силовым линиям поля (вектору напряженности поля). Из неоднородного магнитного поля он вытал­кивается в направлении уменьшения напряжённости поля [2, С.301].

Индуцированный магнитный момент ***I*,** приобретаемый 1 *молем* диамагнитного вещества, пропорционален напряженности внешнего поля **H,** т.е. ***I=χН.***Коэффициент **χ** называется **молярной диамагнитной** **восприимчивостью** и имеет отрицательный знак (т.к. ***I*** и ***H***направлены навстречу друг другу). Обычно абсолютная величина **χ**мала (~10-6), например для 1 *моля* гелия **χ** = -1,9·10-6.

Классическими диамагнетиками являются так называемые инертные газы (He, Ne, Ar, Kr и Xe), атомы которых имеют замкнутые внешние электронные оболочки.

К диамагнетикам также относятся: инертные газы в жидком и кристаллическом состояниях; соединения, содержащие ионы, подобные атомам инертных газов (Li+, Be2+ , Al3+ , O2- и т.д.); галоиды в газообразном, жидком и твердом состояниях; некоторые металлы (Zn, Au, Hg и др.). Диамагнетиками, точнее сверхдиамагнетиками, с **χД** = - (1/4π) ≈ 0,1, являются ***сверхпроводники;***у них диамагнитный эффект (выталкивание внешнего магнитного поля) обусловлен поверхностными макроскопическими токами. К диамагнетикам относится большое число органических веществ, причём у многоатомных соединений, особенно у циклических (ароматических и др.), магнитная восприимчивость анизотропна (таблица 6.1).

Таблица 6.1 − Диамагнитная восприимчивость ряда материалов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | χД ·106 | Вещество | χД ·106 |
| Металлы  Медь Cu …………  Бериллий Be………  Цинк Zn…………  Серебро Ag ………  Золото Au …………  Ртуть Hg …………  Висмут Bi …………  Неорганические  соединения  H2O (жидкость)…..  CO2 (газ)……….…  NaCl (кристалл)…..  Al2O3 (кристалл)…..  CuCl (кристалл)……  PbO (кристалл)…..  AgNO3 (кристалл)…  PbSO4 (кристалл)…  BiCl3 (кристалл)… | -5,41  -9,02  -11,4  -21,5  -29,6  -33,4  -284 (ср.)  -13 (0º C)  -21  -30,3  -37,0  -40,0  -42,0  -43,7  -69,7  -100 | Органические  соединения  Метан CH4 (газ)…  Бензол C6H6  (жидкость)………....  Анилин C6H7  (жидкость)…………  Нафталин C10H6 (жидкость)…………  Октан C8H6  (жидкость)…………  Дифениламин C12H11N  (кристалл) …………  Тетрафенилатилен C21H20 (кристалл)… | -16,9  -54,8 (ср.)  -62,9  -91,8 (ср.)  -96,8  -107  -217 |

**Б) Парамагнетики**

**Парамагнетизм** – свойство веществ ***(парамагнетиков)***намагничиваться в направлении внешнего магнитного поля, и, в отличие от ферро-, ферри- и антиферромагнетизма, парамагнетизм не связан с *магнитной атомной структурой,* а в отсутствие внешнего магнитного поля *намагниченность* парамагнетика равна нулю.

Парамагнетизм обусловлен в основном ориентацией под действием внешнего магнитного поля ***Н*** собственных магнитных моментов **µ** частиц парамагнетического вещества (атомов, ионов, молекул). Природа этих моментов может быть связана с орбитальным движением электронов, их спином, а также (в меньшей степени) со спином атомных ядер. При **µ*Н*** « ***kТ****,* где ***Т***– абсолютная температура, намагниченность парамагнетика ***М*** пропорциональна внешнему полю: ***М=χН,***где **χ** – ***магнитная восприимчивость.***В отличие от диамагнетизма, для которого **χ < 0,** при парамагнетизме восприимчивость положительна; её типичная величина при комнатной температуре *(Т ≈* 293 К) составляет 10-7 – 10-4.

**Парамагнетик** – магнетик с преобладанием *парамагнетизма* и отсутствием магнитного атомного порядка. Парамагнетик намагничивается в направлении внешнего магнитного поля, т.е. имеет положительную *магнитную восприимчивость,* которая в слабом поле при не очень низкой температуре (т.е. вдали от условий магнитного насыщения) не зависит от напряженности поля. Поскольку свободная энергия парамагнетика понижается в магнитном поле, при наличии градиента поля он втягивается в область с более высоким значением напряжённости магнитного поля. Конкуренция диамагнетизма, появление дальнего магнитного порядка или сверхпроводимости ограничивают область существова­ния вещества в парамагнитном состоянии[2, С.299].

Парамагнетик содержит, по крайней мере, один из перечисленных ниже типов носителей парамагнетизма.

а) Атомы, молекулы или ионы с некомпенсированными *магнитными моментами* восновном или возбуждённом состояниях с энергией возбуждения ***Ei* « *kТ****.* Парамагнетики этого типа обладают ориентацией ланжевеновским парамагне­тизмом, зависящим от температуры ***Т***по *Кюри закону* или *Кюри* – *Вейса закону,* в них возможно магнитное упоря­дочение. [Похожий по проявлениям магнетизм неоднородных систем малых ферро- или ферримагнитных однодоменных частиц (**кластеров**) в жидкостях или твердых матрицах выделен в особый вид – ***суперпарамагнетизм***].

Этот тип носителей присутствует в парах металлов нечётной валентности (Na, Тl); в газе молекул О2 и NO; в некоторых органических молекулах со свободными радикалами; в солях, окислах и др. диэлектрических соединениях **3*d*-,** **4*f*-,** и **5*f*-**элементов; в большинстве редкоземельных металлов.

б) Те же частицы, имеющие орбитальный магнитный момент в возбуждённом состоянии с энергией возбуждения ***Ei* « *kТ****.* Для таких парамагнетиков характерен не зависящий от температуры **поляризационный *парамагнетизм.***

Этот тип носителей парамагнетизма проявляется в некоторых соединениях ***d*-** и ***f*-**элементов (соли Sm и Eu и др.).

в) Коллективизированные электроны в частично запол­ненных энергетических зонах. Им присущ сравнительно слабо зависящий от температуры спиновый ***Паули-парамагнетизм,***как правило, усиленный межэлектронными взаимодействиями. В ***d*-**зонах спиновый парамагнетизм сопровождается заметным ванфлековским парамагнетизмом.

Подобный тип носителей преобладает в щелочных и щёлочноземельных металлах, ***d*-**металлах и их интерметаллических соединениях, актиноидах, а также в хорошо проводящих ион-радикальных органических солях:

O2 Li

NO Ca

FeCl2 Al

EuCl3 Pt

UF6 U

**В) Ферромагнетики**

**Ферромагнетизм –** магнитоупорядоченное состояние вещества, при котором все магнитные моменты атомных носителей магнетизма в веществе параллельны, и оно обладает самопроизвольной намагниченностью [2, С.301].

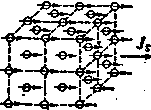


Рисунок 6.1–Ферромагнитная (коллинеарная) атомная структура гранецентрированной кубической решётки. Ниже точки Кюри **θ** стрелками обозначены направления атомных моментов; ***Js*** – вектор суммарной намагниченности единиц объёма.

Параллельная ориентация магнитных моментов (рисунок 6.1) устанавливается при температурах ***Т***ниже критической температуры Кюри **θ***.* Часто ферромагнетизм называется совокупностью физических свойств вещества в указанном выше состоянии. Вещества, в которых установился ферромагнитный порядок атомных магнитных моментов, называются ***фер­ромагнетиками.***



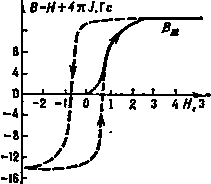


Рисунок 6.2 –Кривая безгистерезисного намагничивания (0*Bm*) и петля гистерезиса поликристаллического железа. Значению индукции *Вт* соответствует намагниченность насыщения *Js*

***Магнитная восприимчивость χ*** ферромагнетиков положительна **(*χ*****>0)** и достигает значений 104-105; их *намагниченность* ***J***и ***магнитная индукция*** *В=H+4πJ* (в *СГС системе единиц* или ***В=(H+J)/µ0*** в единицах СИ) растут с увеличением напряжённости магнитного поля H нелинейно (рисунок 5.2) и в полях до 100 Э (7,96·103 А/м) достигают предельного значения ***Js*** – ***магнитного насыщения***и ***Вт.***Значение ***J*** зависит от «магнитострикции предыстории» образца, что делает зависимость ***J*** от ***H*** неоднозначной (наблюдается магнитный ***гистерезис****).* При намагничивании ферромагнетиков изменяются их размеры и форма, т.е. наблюдается **м*агнитострикция.***Имеется и обратный эффект – кривые намагничивания и петли гистерезиса зависят от внешних механических напряжений. В ферромагнитных монокристаллах наблюдается **м*агнитная анизотропия***– различие магнитных свойств по разным кристаллографическим направлениям. В поликристаллах с хаотичным распределением ориентации кристаллических зёрен анизотропия в среднем по образцу отсутствует, но при неоднородном распределении ориентации она может наблюдаться *(****текстура магнитная****).*

**Ферромагнетик** – вещество, в котором ниже определённой температуры *(Кюри точки)* – устанавливается ферромагнитный порядок *магнитных моментов* атомов или ионов (в неметаллических кристаллах) или магнитных моментов коллективизированных электронов (в металлических кристаллах). Среди химических элементов ферромагнитные переходные элементы: Fе, Со и Ni (***3d-***металлы) иредкоземельные металлы Gd, Тb, Dу; Но, Ег, Тm (таблица 6.2 ).

Таблица 6.2 − Ферромагнитные металлы

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Металлы | Θ, К | ***J SO1 Гс \**** |
| Fe  Co  Ni  Gd  Tb  Dy  Ho  Er  Tm | 1043  1403  631  289  219 \*\*  87 \*\*  20 \*\*  19,6 \*\*  25 \*\* | 1735,2  1445  508,8  1980  2713  1991,8  3054,6  1872,6 |

\*J*so* - *намагниченность ед. объёма при абсолютном нуле температуры*.

\*\* *Точка перехода из ферромагнитного в антиферромагнитное состояние*.

Для **3d**-металлов и Gd характерна коллинеарная ферромагнитная атомная структура, а для остальных редкоземельных ферромагнетиков – неколлинеарная (спиральная, циклоидальная и синусоидальная).

Ферромагниты также многочисленны: металлические бинарные и более сложные (многокомпонентные) сплавы и соединения упомянутых металлов между собой и с другими неферромагнитными элементами; сплавы и соединения Сг и Мn с неферромагнитными элементами (Гейслеровы сплавы), соединения ZrZn2 и ZrxM1-x (где М – это Тi, Y, Nb или Hf), Au4V, Sc3Ln и др. (таблица 6.3), а также некоторые соединения группы актинидов, например UH3.

Таблица 6.3 − Ферромагнитные соединения

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Соединения | Θ, К | Соединения | Θ, К |
| Fe3Al  Ni3Mn  FePd3  MnPt3  CrPt3  ZnCMn3  AlCMn3 | 743  773  705  350  580  353  275 | TbN  DyN  EuO  MnB  ZrZn3  Au4V  Sc3In | 43  26  77  578  35  42 – 43  5 – 6 |

Особую группу ферромагнетиков образуют сильно разбавленные растворы замещения парамагнитных атомов, например Fe или Co в диамагнитной матрице Pd. В этих веществах атомные магнитные моменты распределены неупорядоченно (при наличии ферромагнитного порядка отсутствует атомный порядок). Ферромагнитный порядок обна­ружен также в аморфных (метастабильных) металлических сплавах и соединениях (***металлические стекла****),*в ***аморфных полупроводниках****,* в обыч­ных органических и неорганических стёклаххалькогенидов (сульфидах, селенидах, теллуридах) и т.п. Число извест­ных неметаллических ферромагнетиков пока невелико. Это, например, ионные соединения типа La1-x СахМn05 (0,4>x>0,2), EuO, Eu2SiO4, EuS, EuSe, EuI2, CrBr3 и т.п. У большинства из них точка Кюри лежит ниже 1 К. Только у сое­динений Eu, халькогенидов, CrB3 значение θ ~ 100 К [2, С.304].

**Г) Антиферромагнетики**

**Антиферромагнетизм –** магнитоупорядоченное состояние вещества, ха­рактеризующееся тем, что *магнитные моменты* соседних частиц вещества – атомов но­сителей магнетизма – ориентированы навстречу друг другу (антипараллель­но) и поэтому намагниченность тела в целом в отсутствии магнитного поля равна нулю. Этим антиферромагнетизм отличается от ферро­магнетизма, при котором одинаковая ориентация всех атомов магнитных моментов приводит к высокой намагниченности тела.

Антиферромагнетизм – упорядоченное состояние вещества, харак­теризующееся тем, что средние магнитные моменты всех (или большей части) ближайших соседей любого иона направлены на­встречу его собственному магнитному моменту. Для этого обменное взаимодействие должно быть отрицательным (при ферромагне­тизме обменное взаимодействие положительно и все магнитные моменты направлены в од­ну сторону). В каждом антиферромаг­нетике устанавливается определённый по­рядок чередования магнитных моментов.

**Антиферромагнетик** – вещество, в котором установился антиферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов*.* Обычно вещество становится антиферромагнетиком ниже определённой температуры ***ТN* (точка *Нееля)***и остаётся антиферромагнетикам вплоть до *T* = 0 K. Из эле­ментов к антиферромагнетикам относятся: твёрдый кислород (α-модификация при T < 24 К), хром - антиферромагнетик с геликоидальной структурой (*TN* =310 К), α-марганец (*TN* =100 К), а также ряд редкоземельных металлов (с *TN* от 60 К у Tu до 230 К у Tb). В последних обычно наблюдаются сложные антиферромагнитные структуры в тем­пературной области между *TN* и некоторой температурой *Т1* (0 К<T1< *TN*); ниже *Т1* они становятся *ферромагне­тиками* [2, С.305]*.*

Число известных химических соединений, которые становятся антиферромагнетиками при определённых температурах, приближается к тысяче.

Таблица 6.4 − Свойства редкоземельных элементов – антиферромагнетиков

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Элементы | T1·K | T*N*·K |
| Dy ...…………………  Ho ……………………  Er ……………………..  Tu …………………….  Tb ……………………. | 85  20  20  22  219 | 179  133  85  80  230 |

**Д) Ферримагнетики**

**Ферримагнетик** –вещество, в котором при температуре ниже *Кюри (точки* ***Тс****)* существует ферримагнитное упорядочение магнитных моментов ионов. Значит, часть ферримагнетиков – это диэлектрические или полупроводниковые ионные кристаллы, содержащие магнитные ионы различных элементов или одного элемента, но находящиеся в разных кристаллографических позициях (в неэквивалентных узлах кристаллической решётки). Среди них наиболее обширный класс хорошо изученных и широко используемых ферримагнетиков образуют ферриты (шпинели, гранаты и гексаферриты).

Другую группу диэлектрических ферритов образуют двойные фториды (типа RbNiF3), в которых из шести магнитных подрешеток намагниченность четырех направлена в одну сторону, а намагниченность двух других – в противоположную. Двойные фториды прозрачны в видимой области спектра. К ферромагнетикам принадлежит также ряд сплавов и интерметаллических соединений. В большинстве – это вещества, содержащие атомы редкоземельных элементов (R) и элементов группы железа (Me). Их магнитная структура состоит из двух магнитных подрешёток: атомов Me и R, соответственно. Интерметаллические соединения типа RFe2 обладают рекордной ***магнитострикцией***(~10-3 в полях 10–15 кГс) и могут быть использованы в качестве ***пьезоэлектрических преобразователей.***Другой тип редкоземельных интерметаллидов имеет формулу, близкую к RMe6. Эти соединения имеют большую энергию анизотропии и, значит, коэрцитивную силу. Из них изготавливают ***магниты постоянные***с рекордной величиной *BHмакс* (~107 Гс·Э).

Таблица 6.5 − Свойства типичных ферромагнетиков

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Тип кристаллической структуры | TC · K | 4π*Js* · Гс | *Р*эфф · µБ |
| Fe3O4  MgFe2O4  CoFe3O6  Y3Fe6O12  Gd3Fe6O12  Ho3Fe8O12  BaFe12O10  Ba3Co3Fe34O41  RbNiF3  TiNiF3  CeNiF3  GdFe2  TbFe3  DyFe2  PrCo3  SmCo3 | шпинель  шпинель  шпинель  гранат  гранат  гранат  гексагональная  гексагональная  гексагональная  гексагональная  кубическая  фаза Лавеса  фаза Лавеса  фаза Лавеса  гексагональная  гексагональная | 858  713  793  560  564  567  730  680  139  111  150  789  698  635  912  1020 | 6400  1800  6000  2470  7250  7400  5220  3350  1080  620  620  692  1090  1300  1150  937 | 4,1  1,1  3,9  5,0  16  15  27  31  -  -  -  3,7  5,6  5,6  10,8  8,7 |

В таблице 5.5 приведены некоторые характеристики типичных ферромагнетиков: температура Кюри *Тс,* магнитная индукция насыщения 4π*JS* и эффективный магнитный момент *P*эфф; *магнетонах Бора* μб (последние две величины для *Т* = 0 К) [2, С.306].

**Е) Метамагнетики**

***Метамагнитными***являются такие материалы, которые в слабых магнитных полях ведут себя как антиферромагнитные, а в сильных магнитных полях – как ферромагнитные, или наоборот. Антиферромагнитными в слабых полях являются MnAs2, диспрозий Dy и эрбий Er. Ферромагнитными − MnAs, MnBi, гольмий Ho и тербий Tb [2, С.307].

1. **Основные виды поляризации (вопрос 4)**

Существо **поляризации** большинства диэлектриков состоит в воз­никновении электрического (дипольного) момента в объёме диэлек­трика вследствие перемещения связанных электрических зарядов (за­рядов, связанных в атомах, молекулах, кристаллической решетке) под действием внешнего электрического поля.

Объясним этот механизм поляризации на примере поляризации атома. Перед приложением внешнего электрического поля положитель­ные и отрицательные заряды в атоме распределены так, что внешне атом проявляет себя как электрически нейтральный. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов при этом совпадают.

При воздействии внешнего электрического поля симметрия в распределении зарядов нарушается, возникает *индуцированный элек­трический момент.* Центр тяжести положительных зарядов при этом смещается в направлении напряженности внешнего поля, а центр тяжести отрицательных зарядов – в противоположном направлении. Такой механизм поляризации называется ***электронной поляризацией****.* Смещение центра тяжести отрицательных зарядов пропорционально напряженности внешнего поля [2, С.169].

Проследим, как этот механизм проявляется на временной зави­симости электрического тока поляризации в течение одного периода (рисунок 7.1).

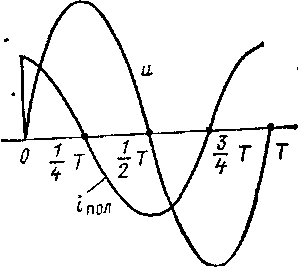


Рисунок 7.1 – Изменение во времени электрического тока

поляризации диэлектрика с электронной поляризацией

В первой четверти периода напряженность внешнего поля непре­рывно возрастает и в момент t = T/4 достигает максимума. Тотчас после приложения поля центр тяжести отрицательных зарядов откло­нится и через диэлектрик потечет относительно большой ток. При дальнейшем возрастании напряженности поля смещение центра тяжести хотя и увеличивается, но все медленнее, так как поле должно преодолевать все большие упругие силы. Поэтому ток постепенно уменьшается. При t = T/4 ток становится равным нулю и смещение электронов против направления напряженности внешнего поля заканчивается. С этого момента направление движения электронов изменится, так как упругие силы связи стремятся возвратить их в исход­ное положение. Поэтому при уменьшении напряженности внешнего поля ток течет в обратном направлении и постепенно уве­личивается. При t = T/2 центры тяжести зарядов находятся в исходном положении. Во втором полупериоде процесс повторяется с той разницей, что заряды смещаются в направлении, обратном направлению их смещения в первом полупериоде. Этот про­цесс периодически повторяется.

**Время, в течение которого заряды в атомах способны реагировать на внеш­нее поле, очень мало и имеет порядок 10-15 с, то есть реакция почти мгновенна, поэтому вектор тока опережает вектор на­пряжения на 90°.**

При других типах поляризации это время больше, так как меха­низм поляризации является иным. Часто речь идет о смещении более тяжелых частиц, встречающих сопротивление среды. В таких случаях опережение вектора тока по отношению к вектору напряжения мень­ше 90° [2, С.170].

Каким бы ни был физический механизм при различных типах поляризации, внешне поляризация проявляется всегда одинаково, т.е. как нарушение симметрии распределения электрических зарядов в ди­электрике. Заряды противоположных знаков, смещенные внешним по­лем со своих равновесных положений, образуют ***электрические диполи****,* поле которых действует навстречу причине их возникновения и спо­собно скомпенсировать часть внешнего электрического поля. Поле диполей связывает часть зарядов на электродах.

В общем случае электрическая поляризация представляет собой комплекс явлений, связанных с различными механизмами поляриза­ции и происходящих на микроскопическом уровне.

Основным механизмом поляризации можно считать упругое сме­щение частиц в диэлектрике. **Поляризация** такого типа называется ***упругой****.* При упругом смещении электронов в атомах говорят об ***упругой электронной поляризации****.* При взаимно упругом смещении противоположно заря­женных ионов в кристаллической решетке ионных кристаллов говорят *об* ***упругой ионной поляризации****.* В случае упругого смещения про­тивоположно заряженных частиц в молекуле с постоянным дипольным моментом говорят об ***упругой дипольной поляризации****.* Общим признаком таких механизмов поляризации является то, что поляризация происходит очень быстро и без потерь.

Может случиться, что индуцированный электрический момент воз­никает в результате смещения слабосвязанных частиц (электронов или ионов), которые не связаны упругими силами, или в результате ори­ентации постоянных диполей в направлении внешнего поля. Реакция этих частиц на изменения внешнего поля уже не такая быстрая, как в случае поляризации упругого типа. После исчезновения внешне­го поля частицы возвращаются в исходное положение не мгновенно, а через определенное время, и не под действием упругих сил связи, а в результате хаотического теплового движения. Такие **механизмы** **поляризации** **называются** ***релаксационными***и характерны тем, что сопровождаются потерями электрической энергии и сильно зависят от интенсивности теплового движения, т. е. от температуры.

К этим основным механизмам поляризации в некоторых специаль­ных случаях добавляются особые типы поляризации – **миграционная и спонтанная.**

***Миграционная поляризация***заключается в возникновении индуци­рованного дипольного момента вследствие смещения свободных заря­дов, которые не имеют возможности нейтрализации на электродах.

Такие заряды концентрируются под действием внешнего поля на бло­кирующих барьерах различного характера и образуют пространствен­ные заряды, поле которых внешне проявляет себя как поляризация особого вида. Это типично для неоднородных диэлектриков.

***Спонтанная поляризация***заключается в ориентации спонтанно (самопроизвольно) образовавшихся электрических моментов в направ­лении внешнего электрического поля. Это типично для сегнетоэлектриков.

Оба особых типа поляризации имеют ***нелинейный***характер.

О релаксационном характере поляризации можно говорить в узком и широком смысле.

В узком смысле релаксационной поляризацией считается такая поляризация, при которой зависимость поляризованности от времени после приложения или снятия внешнего постоянного поля имеет экспоненциальный характер и описывается выражениями (7.1) или (7.2).

После приложения поля поляризованность растет во времени

, (7.1)

где Pr(t) – релаксационная поляризованность в момент t; Pr∞(t) – релаксационная поляризованность в установившемся состоянии; *Т* – постоянная времени; **e** – основание натуральных логарифмов (**e** =2,718).

После снятия внешнего поля релаксационная поляризованность уменьшается согласно формуле

. (7.2)

Кривые изменения релаксационной поляризованности во времени при приложении и снятии внешнего поля показаны на рисунке 7.2.

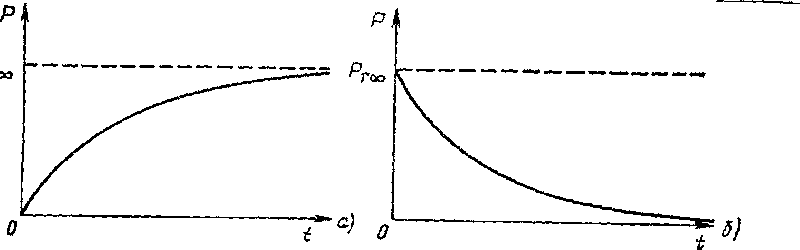


Рисунок 7.2 – Изменение во времени поляризованности

при релаксационном характере поляризации:

a – при возникновении; б – при исчезновении

Важным параметром процесса релаксационной поляризации явля­ется ***постоянная времени Т****.* Она равна времени, за которое релакса­ционная поляризованность после снятия электрического поля уменьшается до **1**/**е**, то есть приблизительно до 37% первоначального уровня. ***Неполярными***считаются такие диэлектрики, частицы которых **не имеют *постоянного дипольного момента***и у которых могут возникать только индуцированные дипольные моменты под действием внешнего электрического поля. Основной вопрос в том, является ли молекула материала полярной или неполярной, принадлежит характеру хими­ческих связей и ориентации диполей. Если эти связи без дипольного момента, то есть чисто ковалентные, или если эти связи – переходного типа с дипольными моментами, которые ориентированы так, что взаимно компенсируются; центры тяжести положительных и отрицатель­ных зарядов в молекулах материала совпадают и материал является неполярным. На практике к неполярным материалам относят и такие полярные материалы, у которых полярность очень слабо выражена, то есть молекулы имеют лишь малый постоянный дипольный момент [2, С.172].

**К неполярным электроизоляционным материалам относятся поли­этилен, политетрафторэтилен, полистирол, парафин** и др. Слабополяр­ным является нефтяное (минеральное) масло.

***Полярными***считаются такие материалы, молекулы которых и без воздействия внешнего электрического поля имеют электрический момент (собственный, или постоянный, дипольный момент). Это моле­кулы, в которых отдельные атомы связаны полярными связями со взаимно нескомпенсированными дипольными моментами связей.

**К полярным материалам относятся целлюлоза, поливинилхлорид, хлорированные дифенилы** и др.

***Поляризованность***диэлектрика равна индуцированному диполь-моменту единицы объема диэлектрика, т. е является суммой элементарных дипольных моментов в единице объёма Способность диэлектрика к поляризации можно охарактеризовать тремя величинами – ***поляризуемостью****,* ***диэлектрической восприимчивостью***и ***относительной******диэлектрической проницаемостью****.* В технике чаще всего используется **относительная диэлектрическая проницаемость**.

Поляризуемость связана с поляризованностью диэлектрика

*P=NαE,* (7.3)

где *Р* – поляризованность; *N* – концентрация индуцированных диполей; α – поляризуемость; *Е* – напряженность постоянного электриче­ского поля.

Относительная диэлектрическая проницаемость и диэлектрическая восприимчивость диэлектрика связаны с поляризованностью

, (7.4)

где  – диэлектрическая постоянная (=8,854·10-12 Ф/м);  – относи­тельная диэлектрическая проницаемость;  - диэлектрическая восприимчивость.

Из сравнения выражений (7.3)и (7.4)следует соотношение между относительной диэлектрической проницаемостью, относительной диэлек­трической восприимчивостью и поляризуемостью диэлектрика

. (7.5)

**8 Сверхпроводники и возможности их применения**

**в электротехнике (вопрос 20)**

**Сверхпроводимость** – свойство многих проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже определённой критической температуры ТК, характерной для данного материала. Сверхпроводимость обнаружена у более чем 25 металлических элементов, у большого числа сплавов и интерметаллических соединений, а также у некоторых ПП и полимеров. Рекордно высоким значением ТК (около 23 К) обладает соединение Nb3Gе [2, С.66].

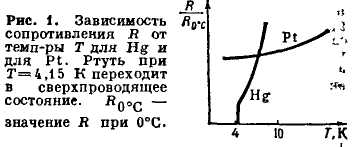


Рисунок 8.1 – Зависимость сопротивления R от темп-ры Т для Hg и для Pt. Ртуть при Т=4,15 К переходит в сверхпроводящее

состояние. R0°C – значение R при 0°С

**Основные явления**. Скачкообразное исчезновение сопротивления ртути при понижении температуры впервые наблюдал голландский

физик X. Камерлинг-Оннес (1911) (рисунок 8.1). Он пришёл к выводу, что ртуть при Т = 4,15 К переходит в новое состояние, которое было названо сверхпроводящим. Несколько позднее Камерлинг-Оннес обнаружил, что электрическое сопротивление ртути восстанавливается при Т < ТК в достаточно сильном магнитном поле.

Падение сопротивления до нуля происходит на протяжении очень узкого интервала температур, ширина которого для чистых образцов составляет 10-3–10-4 К и возрастает при наличии примесей и других дефектов структуры[2, С.266].

Отсутствие сопротивления в сверхпроводя­щем состоянии с наибольшей убедительностью демонстрируется опы­тами, в которых в сверхпроводящем кольце возбуждается ток, практиче­ски не затухающий. В одном из вариантов опыта используются два кольца из сверхпроводящего металла. Большее из колец неподвижно закрепля­ется, а меньшее концентрически подвешивается на упругой нити таким образом, что когда нить не закручена, плоскости колец образуют между собой некоторый угол. Кольца охлаждаются в присутствии магнитного поля ниже температуры ТК, после чего поле выключается. При этом в кольцах возбуждаются токи, взаимодействие между которыми стремится уменьшить первоначальный угол между плоскостями колец. Нить закручивается, а наблюдаемое постоянство угла закручивания показывает, что токи в кольцах являются незатухающими. Опыты такого рода позволили установить, что сопротивление металла в сверхпроводящем состоянии меньше, чем 10-20 Ом·см (сопротивление чистых образцов Си или Ag составляет около 10-9 Ом∙см при температуре жидкого гелия). Однако сверхпроводник не является просто идеальным проводником, и позднее установили, что слабое магнитное поле не проникает в глубь сверхпроводника независимо от того, было ли поле включено до или после перехода металла в сверхпроводящее состояние. В отличие от этого, идеальный проводник (т. е. проводник с исчезающе малым сопротивлением) должен захватывать пронизывающий его магнитный поток (рисунок 8.2, а, б, в) [2, С.67].

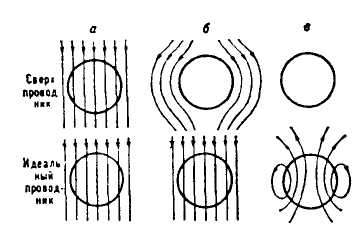


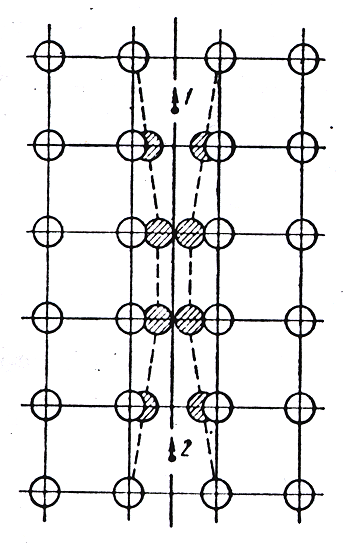
Рисунок 8.2 – Распределение магнитного поля около сверхпроводящего шара с исчезающим сопротивлением (идеальный проводник): а – при Т>ТК; б – при Т<ТК, внеш.поле НВН ≠

0; в – при Т<ТК, Н = НВН

Выталкивание магнитного поля из сверхпроводящего образца (эффект Мейснера) означает, что в присутствии внешнего магнитного поля такой образец ведёт себя как идеальный диамагнетик той же формы с магнитной восприимчивостью η=1/4π. В частности, если образец имеет форму длинного сплошного цилиндра, а внешнее поле Н однородно и параллельно оси цилиндра, то магнитный момент, отнесённый к единице объёма, М = –Н/4π. Это примерно в 106 раз больше по абсолютной величине, чем для металла в нормальном состоянии. Эффект Мейснера связан с тем, что при Н < НК в поверхностном слое (толщиной 10-5–10-6 см) сверхпроводящего цилиндра появляется круговой незатухающий ток, сила которого как раз такова, что магнитное поле этого тока компенсирует внешнее поле в толще сверхпроводника.

Физическая природа сверхпроводимости. Явление сверхпроводимости можно понять и обосновать только с помощью квантовых представлений. Почти полвека с момента открытия сущность этого явления оставалась неразгаданной из-за того, что методы квантовой механики еще не в полной мере использовались в физике твердого тела. Микроскопическая теория сверхпроводимости, объясняющая все опытные данные, была пред­ложена в 1957 г. американскими учеными Бардиным, Купером и Шриффером (теория БКШ). Значительный вклад в развитие теории сверхпроводимости внесли работы советского академика Н.Н. Боголюбова. Согласно установившимся представлениям, явление сверхпроводимости возникает в том случае, когда электроны в металле притягиваются друг к другу. При­тяжение электронов возможно только в среде, содержащей положительно заряженные ионы, поле которых ослабляет силы кулоновского отталкивания между электронами. Притягиваться могут лишь те электроны, которые принимают участие в электропроводности, т.е. расположенные вблизи уровня Ферми. Если такое притяжение имеет место, то электроны с противоположным направлением импульса и спина связываются в пары, называемые куперовскими. В образовании куперовских пар решающую роль играют взаимодействие электронов с тепловыми колебаниями решетки – фононами. В твердом теле электроны могут как поглощать, так и порождать фононы. Мысленно представим себе следующий процесс: один из электронов, взаимодействуя с решеткой, переводит ее в возбужденное состояние и изменяет свой импульс; другой электрон, также взаимодействуя с решеткой, переводит ее в нормальное состояние и тоже изменяет свой импульс. В результате состояние решетки не изменяется, а электроны обмениваются квантами тепловой энергии – фононами. Обменное фононное взаимодействие и вызывает силы притяжения между электронами, которые превосходят силы кулоновского отталкивания. Обмен фононами при участии решетки происходит непрерывно. В упрощенном виде обменное фононное взаимодействие проиллюстрировано схемой (рисунок 8.3). Электрон, движущийся среди положительно заряженных ионов, поляризует решетку, т. е. электростатическими силами притягивает к себе ближайшие ионы. Благодаря такому смещению ионов в окрестности траектории электрона локально возрастает плотность положительного заряда. Второй электрон, движущийся вслед за первым, естественно, может притягиваться областью с избыточным положительным зарядом. В результате косвенным образом, за счет взаимодействия с решеткой, между электронами 1 и 2 возникают силы притяжения. Второй электрон становится партнером первого – образуется куперовская пара. Поскольку силы притяжения невелики, спаренные электроны слабо локализованы в пространстве. Эффективный диаметр куперовской пары имеет порядок 10-7 м, т. е. охватывает тысячи элементарных ячеек. Эти парные образования перекрывают друг друга, постоянно распадаются и вновь создаются, но в целом все пары образуют электронный конденсат, энергия которого за счет внутреннего взаимодействия меньше, чем у совокупности разобщенных нормальных электронов. Вследствие этого в энергетическом спектре сверхпроводника появляется энергетическая щель ΔД – область запрещенных энергетических состояний (рисунок 8.4). Спаренные электроны располагаются на дне энергетической щели. Грубая оценка показывает, что количество таких электронов составляет около 10-4 от общего их числа[2, С.69].

Рисунок 8.3 – Схема образования электронных пар в сверхпроводящем металле



Размер энергетической щели зависит от температуры, достигая максимального значения при абсолютном нуле и полностью исчезая при Т = Тсв. Теория БКШ дает следующую связь ширины щели с критической температурой перехода

 (8.1)



Рисунок 8.4 **–** Распределение электронов по энергиям в металле в состоянии сверхпроводимости

Формула (8.1) достаточно хорошо подтверждается экспериментально. Для большинства сверхпроводников энергетическая щель составляет 10-4–10-3 эВ.

Как было показано, электрическое сопротивление металла обусловлено рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки и на примесях. Однако при наличии энергетической щели для перехода электронов из основного состояния в возбужденное требуется достаточная порция тепловой энергии, которую при низких температурах электроны не могут получить от решетки, поскольку энергия тепловых колебаний меньше ширины щели. Именно поэтому спаренные электроны не рассеиваются на дефектах структуры. Особенностью куперовских пар является их импульсная упорядоченность, состоящая в том, что все пары имеют одинаковый импульс и не могут изменять свои состояния независимо друг от друга. Электронные волны, описывающие движение пар, имеют одинаковые длину и фазу. Фактически движение всех электронных пар можно рассматривать как распространение одной электронной волны, которая не рассеивается решеткой, «обтекает» дефекты структуры. Такая согласованность в поведении пар обусловлена высокой мобильностью электронного конденсата: непрерывно меняются наборы пар, происходит постоянная смена партнеров.



Рисунок 8.5 **–** Изменение удельного сопротивления олова вблизи температуры перехода в состоянии сверхпроводимости:

1 – монокристалл; 2 – поликристалл;

3 – поликристалл с примесями

При абсолютном нуле все электроны, расположенные вблизи уровня Ферми, связаны в пары. С повышением температуры за счет тепловой энергии происходит разрыв некоторой части электронных пар, вследствие чего уменьшается ширина щели. Движение неспаренных электронов, переходящих с основных уровней на возбужденные, затрудняется рассеянием на дефектах решетки. При температуре Т = Тсв происходит полный разрыв всех пар, ширина щели обращается в нуль, сверхпроводимость исчезает [2, С.70].

Переход вещества в сверхпроводящее состояние при его охлаждении происходит в очень узком интервале температур (сотые доли градуса). Неоднородности структуры, создаваемые примесями, искажениями решетки, границами зерен, не приводят к уничтожению сверхпроводимости, а вызывают лишь расширение температурного интервала перехода из одного состояния в другое (рисунок 8.5). Электроны, ответственные за создание сверхпроводимости, не обмениваются энергией с решеткой.

Поэтому при температуре ниже критической наблюдается существенное уменьшение теплопроводности металлов.



Рисунок 8.6 **–** Зависимость изменения магнитной индукции внутри сверхпроводника от напряженности внешнего

магнитного поля:

а – сверхпроводник I рода; б – сверхпроводник II рода

Магнитные свойства сверхпроводников. Важнейшая особенность сверхпроводников состоит в том, что внешнее магнитное поле совершенно не проникает в толщу образца, затухая в тончайшем слое.

Силовые линии магнитного поля огибают сверхпроводник. Это явление, получившее название эффекта Мейснера, обусловлено тем, что в

поверхностном слое сверхпроводника при его внесении в магнитное поле возникает круговой незатухающий ток, который полностью компенсирует внешнее поле в толще образца. Глубина, на которую проникает магнитное поле, обычно составляет 10-7–10-8 м. Таким образом, сверхпроводники по магнитным свойствам являются идеальными диамагнетиками с магнитной проницаемостью μ = 0. Как всякие диамагнетики, сверхпроводники выталкиваются из магнитного поля. При этом эффект выталкивания выражен столь сильно, что открываются возможности удерживать груз в пространстве с помощью магнитного поля. Аналогичным образом можно заставить висеть постоянный магнит над кольцом из сверхпроводящего материала, в котором циркулируют индуцированные магнитом незатухающие токи (опыт В. К. Аркадьева).

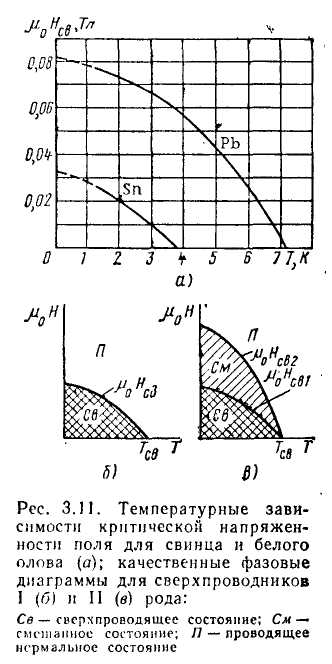


Рисунок 8.7 **–** Температурные зависимости критической напряженности поля для свинца и белого олова (*а*); качественные фазовые диаграммы для сверхпроводников I(*б*) и II(*в*) рода:

*Св –* сверхпроводящее состояние; *См –* смешанное состояние; *П –* проводящее нормальное состояние

Состояние сверхпроводимости может быть разрушено, если напряженность магнитного поля превысит некоторое критическое значение НСВ. По характеру перехода материала из сверхпроводящего состояния в состояние обычной электропроводности под действием магнитного поля различают сверхпроводники I и II рода. У сверхпроводников I рода этот переход происходит скачкообразно, как только напряженность поля достигнет критического значения. Кривая намагничивания таких материалов показана на рисунке 2 13. Сверхпроводники II рода переходят из одного состояния в другое постепенно; для них различают нижнюю НСВ1 и верхнюю НСВ2 критические напряженности поля. В интервале между ними материал находится в промежуточном гетерогенном состоянии, в котором сосуществуют нормальная и сверхпроводящая фазы. Соотношение между их объемами зависит от Н. Таким образом, магнитное поле постепенно проникает в сверхпроводник II рода (рисунок 8.7). Однако материал сохраняет нулевое сопротивление вплоть до верхней критической напряженности поля.

Критическая напряженность магнитного поля зависит от температуры. При Т = ТСВ она обращается в нуль, но монотонно возрастает при стремлении температуры к ОК. Для сверхпроводников I рода температурная зависимость НСВ в хорошем приближении описывается выражением

, (8.2)

где НСВ(0) – напряженность критического поля при температуре абсолютного нуля. Иллюстрацией зависимости (8.2.) служат кривые на рисунке 8.7, а. Различия в свойствах сверхпроводников I и II рода подчеркивают фазовые диаграммы, показанные на рисунке 8.7,б,в. Область промежуточного (смешанного) состояния, существующая у сверхпроводников II рода, расширяется при понижении температуры. Различие между НСВ1 и НСВ2 может быть в сотни раз. Критическая напряженность магнитного поля для сверхпроводников I рода составляет приблизительно 105 А/м, а у сверхпроводников II рода значение верхней критической напряженности может превышать 107 А/м. Сверхпроводимость может быть разрушена не только внешним магнитным полем, но и током, проходящим по сверхпроводнику, если он превышает некоторое критическое значение IСВ. Для сверхпроводников I рода предельная плотность тока ограничивается достижением на поверхности образца критической напряженности магнитного поля. В случае длинной прямолинейной проволоки круглого сечения радиуса r предельный ток определяется формулой

. (8.3)

Поскольку в сверхпроводящих элементах ток проходит в тонком поверхностном слое, средняя плотность тока, отнесенная ко всему поперечному сечению, уменьшается с увеличением диаметра провода. Для сверхпроводников II рода соотношение (8.3) не выполняется и связь между IСВ и IIСВ носит более сложный характер.

Сверхпроводящие материалы. Явление сверхпроводимости при криогенных температурах достаточно широко распространено в природе. Сверхпроводимостью обладают 26 металлов. Большинство из них являются сверхпроводниками I рода с критическими температурами перехода ниже 4,2 К. В этом заключается одна из причин того, что большинство сверхпроводящих металлов для электротехнических целей применить не удается. Еще 13 элементов проявляют сверхпроводящие свойства при высоких давлениях. Среди них такие полупроводники, как кремний, германий, селен, теллур, сурьма и др. Следует заметить, что сверхпроводимостью не обладают металлы, являющиеся наилучшими проводниками в нормальных условиях. К ним относятся золото Au, медь Cu, серебро Ag. Малое сопротивление этих материалов указывает на слабое взаимодействие электронов с решеткой. Такое слабое взаимодействие не создает вблизи абсолютного нуля достаточного межэлектронного притяжения, способного преодолеть кулоновское отталкивание. Поэтому и не происходит их переход в сверхпроводящее состояние.

Кроме чистых металлов сверхпроводимостью обладают многие интерметаллические соединения и сплавы. Общее количество наименований известных в настоящее время сверхпроводников составляет около 2000. Среди них самыми высокими критическими параметрами обладают сплавы и соединения ниобия Nb (таблица 8.1 и таблица 8.2). Некоторые из них позволяют использовать для достижения сверхпроводящего состояния вместо жидкого гелия более дешевый хладагент – жидкий водород [2, С.72].

Несмотря на то, что принципиальные причины возникновения сверхпроводимости твёрдо установлены, современная теория не даёт возможности рассчитать значения Тк или Нк для известных сверхпроводников или предсказать их для нового сверхпроводящего сплава. Однако ряд эмпирических закономерностей – правил Маттиаса (1955) – позволяет определить направление поисков сплавов с высокими Тк и Нк.

Таблица 8.1 − Отличительные особенности сверхпроводников

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | ТСВ, К | μ0НСВ1(0),  Тл | μ0НСВ2(0),  Тл | JДОU(0),  А/м2 | Отличительные  особенности |
| V3Ga | 14,8 | 0,6 | 21 | 1,6·109 | Удовлетворительные  механические свойства |
| V3Si | 17,0 | 0,62 | 23,4 | 2·109 | То же |
| Nb3Sn | 18,3 | 0,54 | 24,5 | 2,4·109 | Высокая плотность тока, технологичность |
| Nb3Ga | 20,3 | - | 34,0 | - | Высокая температура  перехода, технологичность |
| Nb3Gе | 21-24,3 | - | 37,0 | 109 | Наиболее высокая температура перехода |

Таблица 8.2 − Значения критических параметров сверхпроводников

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вещество | Критическая  температура  ТК, К | Критическое поле  Н0,Э |
|  | *Сверхпроводники 1-го рода* |  |
| Свинец | 7,2 | 800 |
| Тантал | 4,5 | 830 |
| Олово | 3,7 | 310 |
| Алюминий | 1,2 | 100 |
| Цинк | 0,88 | 53 |
| Вольфрам | 0,01 | 1.0 |
| Ниобий | 9,25 | 4000 |
| Сплав НТ-50 |  |  |
| (Ni-Ti-Zr) | 9,7 | 100000 |
| Сплав Ni-Ti | 9,8 | 100000 |
| V3Ga | 14,5 | 350000 |
| Nb3Sn | 18,0 | 250000 |
|  | *Сверхпроводники 2-го рода* |  |
| PbMo4S8 | ~ | 600000 |
| Nb3Ge | 23 | ± |
| GeTe\* | 0,17 | - |
| SrTiO3 | 0,2-0,4 | 130 |

Все интерметаллические соединения и сплавы относятся к сверхпроводникам II рода. Однако деление веществ по их сверхпроводящим свойствам на два вида не является абсолютным. Любой сверхпроводник I рода можно превратить в сверхпроводник II рода, если создать в нем достаточную концентрацию дефектов кристаллической решетки. Например, у чистого олова Тсв = 3,7 К, но если вызвать в олове резко неоднородную механическую деформацию, то критическая температура возрастет до 9 К, а критическая напряженность магнитного поля увеличится в 70 раз.

Сверхпроводимость никогда не наблюдается в системах, в которых существует ферро- или антиферромагнетизм. Образованию сверхпроводящего состояния в полупроводниках препятствует малая концентрация свободных электронов. Однако в материалах с большой диэлектрической проницаемостью силы кулоновскою отталкивания между электронами в значительной мере ослаблены. Поэтому некоторые из них также проявляют свойства сверхпроводников при низких температурах. Примером может служить титанат стронция (SrTiO3), относящийся к группе сегнетоэлектриков. Ряд полупроводников удается перевести в сверхпроводящее состояние добавкой большой концентрации легирующих примесей (GeTe, SnTe, CuS и др.).

В настоящее время промышленность выпускает широкий ассортимент сверхпроводящих проволок и лент для самых различных целей. Изготовление таких проводников связано с большими технологическими трудностями. Они обусловлены плохими механическими свойствами многих сверхпроводников, их низкой теплопроводностью и сложной структурой проводов. Особенно большой хрупкостью отличаются интерметаллические соединения с высокими критическими параметрами. Поэтому вместо простых проволок и лент приходится создавать композиции из двух (обычно сверхпроводник с медью) и даже нескольких металлов. Для получения многожильных проводов из хрупких интерметаллов особенно перспективен бронзовый метод (или метод твердофазной диффузии), освоенный промышленностью. По этому методу прессованием и волочением создается композиция из тонких нитей ниобия в матрице из оловянной бронзы. При нагреве олово Sn из бронзы диффундирует в ниобий Nb, образуя на его поверхности тонкую сверхпроводящую пленку станнида ниобия Nb3Sn. Такой жгут может изгибаться, но пленки остаются целыми [2, С.74]. **Применение сверхпроводников в различных областях науки техники**. Сверхпроводящие элементы и устройства находят все более широкое применение в самых различных областях науки и техники. Разработаны крупномасштабные долгосрочные программы промышленного использования сильноточной сверхпроводимости.

Одно из главных применений сверхпроводников связано с получением сверхсильных магнитных полей. Сверхпроводящие соленоиды позволяют получать однородные магнитные поля напряженностью свыше 107 А/м в достаточно большой области пространства, в то время как пределом обычных электромагнитов с железными сердечниками являются напряженности порядка 106 А/м. К тому же в сверхпроводящих магнитных системах циркулирует незатухающий ток, поэтому не требуется внешний источник питания. Сильные магнитные поля необходимы при проведении научных исследований. Сверхпроводящие соленоиды позволяют в значительной мере уменьшить габариты и потребление энергии в синхрофазотронах и других ускорителях элементарных частиц. Перспективно использование сверхпроводящих магнитных систем для удержания плазмы в реакторах управляемого термоядерного синтеза, в магнитогидродинамических (МГД) преобразователях тепловой энергии в электрическую, в качестве индуктивных накопителей энергии для покрытия пиковых мощностей в масштабах крупных энергосистем. Широкое развитие получают разработки электрических машин со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Применение сверхпроводников позволяет исключить из машин сердечники из электротехнической стали, благодаря чему уменьшаются в 5 – 7 раз их масса и габариты при сохранении мощности. Экономически обосновано создание сверхпроводящих трансформаторов, рассчитанных на высокий уровень мощности (десятки-сотни мегаватт). Значительное внимание в разных странах уделяют разработке сверхпроводящих линий электропередач на постоянном и переменном токах. Разработаны опытные образцы импульсных сверхпроводящих катушек для питания плазменных пушек и систем накачки твердотельных лазеров. В радиотехнике начинают использовать сверхпроводящие объемные резонаторы, обладающие, благодаря ничтожно малому электрическому сопротивлению, очень высокой добротностью

[2, С.75].

**9 Векторное изображение электрических величин (тока, напряжения, ЭДС). Примечание комплексных чисел для расчета электрических цепей. Представление синусоидальных э.д.с., напряжений и токов**

**комплексными числами**

При изображении вращающихся векторов синусоидальных э.д.с, напряжения и тока на комплексной плоскости ось абсцисс плоскости декартовых координат совмещают с осью действительных или вещественных величин (ось + 1) комплексной плоскости. Тогда мгновенные значения синусоидальных величин получают на оси мнимых величин (ось+j) [18].

Как известно, каждому вектору на комплексной плоскости соответствует определенное комплексное число, которое может быть записано в показательной, тригонометрической или алгебраической форме. Например, э.д.с. Emsm (cot + ц/с) изображенной на рисунке 9.1 вращающимся вектором, соответствует комплексное число.

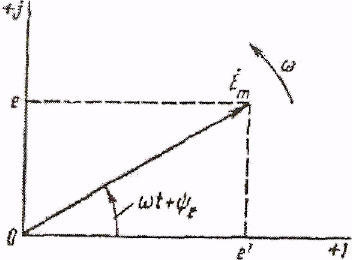


Рисунок 9.1 - Изображение синусоидальной э.д.с. вращающимся вектором на комплексной плоскости

Um=Um+jUm, (9.1)

Em ef(ωt+ψe)= Em cos(ωt+ψe)+jEmsi n+(ωt+ψe)= е'+je (9.2)

Фазовый уголь *a>t+ у/,* определяют по проекциям вектора на оси координат +1

tg (ωt+ψe)= е/е' (9.3)

Мнимая составляющая комплексного числа вектора на комплексной плоскости определяет синусоидальное изменение э.д.с. и обозначается символом Im

e=Em sin(ωt+ψe)=Im Em е'(ωt+ψe). (9.4)

Комплексное число E j(ωt+ψe ) удобно представить в виде произведения двух комплексных чисел

Em е'(ωt+ψe)= Em е' ψe e ωt = Em е(ωt (9.5)

Первое комплексное число Em соответствующее положению вектора в начальный момент времени, называют комплексной амплитудой

Em = Em еtψe (9.6)

Второе комплексное число Eψ является оператором поворота вектора на

угол *cat* относительно начального положения вектора.

Следовательно, мгновенное значение синусоидальной величины равно

мнимой части без знака j произведения комплекса амплитуды Ет и

оператора вращения

e=Em sin(ωt+ψe)=Im Em еjωt. (9.7)

Переход от одной формы записи синусоидальных э.д.с, токов и

напряжений к другой осуществляется весьма просто с помощью формулы

Эйлера еjωt *-* cos +/sin *a.*

Если, например, комплексная амплитуда напряжения задана в виде

комплексного числа в алгебраической форме

*Um =Um+ jUm*  (9.8) то, чтобы записать ее в показательной форме, необходимо найти начальную фазу *<р* „, т.е. угол, который образует вектор *Um* с осью + 1.

В данном случае вектор *Um* расположен в первом квадранте комплексной плоскости, и его начальная фаза (рисунок 9.2)определяется соотношением

*Tg ψu=Um /Um* (9.9)

Мгновенные значения напряжения

u=ImUm e ωt =ImUme'(ωt+ψe)= Um sin(ωt+ψe), (9.10)

Рассмотрим другой пример, когда комплексная амплитуда тока задана комплексным числом

Im=-Im+jIm  (9.11)

Вектор комплексной амплитуды тока /т расположен во втором квадранте комплексной плоскости (рисунок 9.3). Начальная фаза этого тока

Ψt=180º-α (9.12)

Где tgψt=tg(180º-α)=- Im/ Im=tgα (9.13)

Если задано мгновенное значение тока в виде синусоиды / = *Imsin(o)e +* , то комплексную амплитуду записывают сначала показательной форме, а затем, по формуле Эйлера, переходят к алгебраической форме

I=Ieiiψ (9.14)

(9.15)

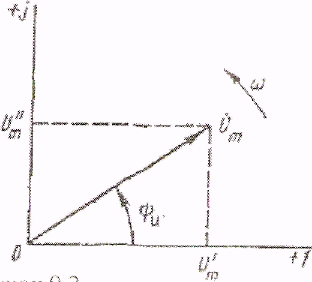


Рисунок 9.2 - начальная вектора комплексной амплитуды напряжения, расположенного в первом квадранте комплексной плоскости.

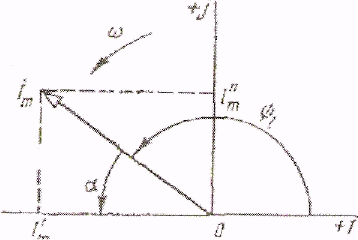


Рисунок 9.3 – первая начальная фаза вектора комплексной амплитуды тока, расположенного во втором квадранте комплексной плоскости

Применение комплексных чисел позволяет от геометрического сложения или вычитания векторов на векторной диаграмме перейти к алгебраическому действию над комплексными числами этих векторов. Например, для определения комплексной амплитуды результирующего тока (см. рисунок 9.4) достаточно сложить два комплексных числа, соответствующих комплексным амплитудам токов ветвей

I3m= Im +I2m =I3mefψ3  (9.16)

Для определения комплексной амплитуды результирующей э.д.с. (см. рисунок 9.4) достаточно определить разность комплексных чисел, соответствующих комплексным амплитудам э.д.с. *Е\т* и *Е\т*.[18].

**Изображение синусоидальных величин с помощью векторов**

При расчете цепей переменного тока часто приходится производить операции сложения и вычитания токов и напряжений. Когда токи и напряжения заданы аналитически или временными диаграммами, эти операции оказываются весьма громоздкими. Существует метод построения векторных диаграмм, который позволяет значительно упростить действия над синусоидальными величинами. Покажем, что синусоидальная величина может быть изображена вращающимся вектором.

Пусть вектор *1т* вращается с постоянной угловой частотой *со* против часовой стрелки. Начальное положение вектора /т, задано углом *у/* (рисунок 9.4.). Проекция вектора *1т* на ось *у* определяется выражением /„, sin *(cot* + *ц/),* которое соответствует

мгновенному значению переменного тока. Таким образом, временная диаграмма переменного тока является разверткой по времени вертикальной проекции вектора /т, вращающегося со скоростью *со .*

Изображение синусоидальных величин с помощью векторов дает возможность наглядно показать начальные фазы этих величин и сдвиг фаз между ними.

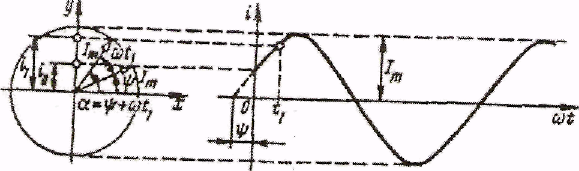


Рисунок 9.4 - Изображение синусоидального тока вращающимися векторами

На векторных диаграммах длины векторов соответствуют действующим значениям тока, напряжения и ЭДС, так как они пропорциональны амплитудам этих величин.

На рисунке 9.5 показаны векторы Ei и Е2 с начальными фазами *ц/i* и *ц/2* сдвигом фаз

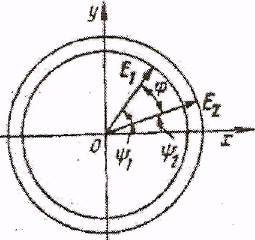
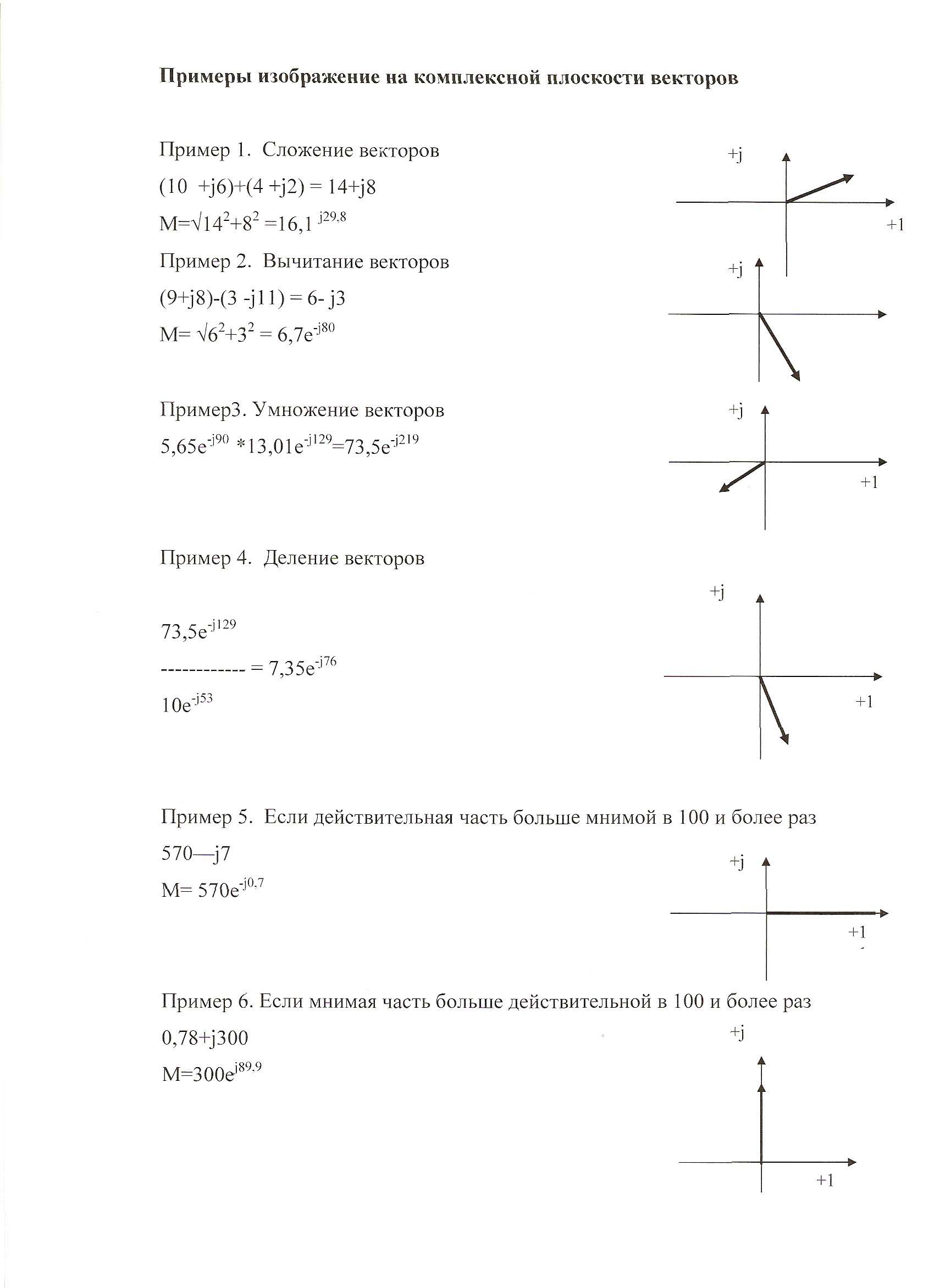


Рисунок 9.5 - Векторная диаграмма синусоидальных Э.Д.С.

Совокупность нескольких векторов, соответствующих нулевому моменту времени, называют векторной диаграммой. Необходимо иметь в виду, что на векторной диаграмме векторы изображают токи (напряжения) одинаковой частоты.



**Ответы на письма в редакцию**

# 

Редакция получила письмо от заведующей вузовской библиотекой. В этом письме задан вопрос о применении ГОСТ 7.1-2003, ответ на который, как нам кажется, носит общий характер и будет полезен многим.

Публикуем и письмо, и ответ на него Э.Р. Сукиасяна, главного редактора ББК, члена редколлегии сборника.

**Уважаемые коллеги!**

**В связи с введением в действие с 1.07.04 г. [ГОСТ 7.1-2003] “Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления” возникают трудности с толкованием его отдельных положений. В частности, в разделе I “Область применения” сказано: “Стандарт распространяется на описание документов, которое составляется библиотеками, органами научно-технической информации, центрами государственной библиографии, издателями, другими библиографирующими учреждениями. Стандарт не распространяется на библиографические ссылки”.**

**Просим разъяснить, обязательно ли применение [ГОСТ 7.1-2003] при составлении списков в диссертациях, монографиях, методических пособиях, дипломных и курсовых работах.**

На поставленный вопрос можно дать очень короткий ответ: да, применение ГОСТ 7.1-2003 при составлении списков литературы в диссертациях, монографиях, методических пособиях, дипломных и курсовых работах обязательно.

Посмотрим последовательно по видам указанных документов, на чем основывается наше утверждение.

Оформление диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, вне зависимости от специальности, подчиняется общим правила ВАК, с которыми любой аспирант, докторант, соискатель ученой степени может ознакомиться, обратившись к ученому секретарю диссертационного совета. В отношении списков в правилах дана ссылка на ГОСТ 7.1-2003. Как быть со ссылками, на которые ГОСТ 7.1-2003 не распространяется? Об этом скажу ниже.

Применение ГОСТ 7.1-2003 в отношении прикнижных или пристатейных списков в монографиях, методических пособиях, сборниках научных трудов и прочих изданиях, конечно, обязательно, так как в области применения указан “издатель”, иначе говоря — издательство или издающая организация (например учебное заведение).

Сложнее доказать, что стандарт распространяется на списки литературы в дипломных и курсовых работах, не предназначенных, как известно, для издания, публикации. Прямо об этом в “области применения” не сказано. Говорят: нельзя заставить “частное лицо” применять государственный стандарт. Тем не менее существуют, как минимум, два обстоятельства, в связи с которыми требований стандарта должны придерживаться кафедры учебных заведений.

**Первое.** У нас пока нет стандартизованного определения библиографирующего учреждения. По смыслу понятно, что оно занимается библиографированием. По ГОСТ 7.76-96, п. 3.1 библиографирование — процесс подготовки библиографической информации. Давайте подумаем: разве не занимается студент, дипломник подготовкой библиографической информации, когда составляет список литературы к своей курсовой или дипломной работе? Но тогда кафедра условно может считаться “библиографирующим учреждением” и должна обязательно требовать у студентов и дипломников применения ГОСТ 7.1-2003.

**Второе.** Сегодня — студент, дипломник. Завтра — кандидат, доктор наук, автор монографии, составитель учебного пособия, методических рекомендаций. Разве не ясна эта последовательность? Чем раньше специалист узнает, как должна быть оформлена грамотная научная или учебная публикация, как. впрочем, и любая другая, тем лучше для него. Тем меньше времени потратит на его рукопись редактор, для которого стандарт обязателен.

**Теперь два слова о ссылках**. Библиографические ссылки имеют особую природу, их оформление регламентируется отдельным международным стандартом ИСО 690. Составление библиографических ссылок будет регламентировать специально подготовленный новый нормативный документ, соответствующий международному стандарту. Ждать его нет смысла: надо умело оформлять ссылки.

**Обратите внимание**: речь идет об оформлении, а не о составлении библиографических ссылок. Давно найден удобный и экономичный прием. К монографии, статье, диссертации, дипломной или курсовой работе составляется нумерованный список литературы, в котором для каждого источника указано количество страниц в соответствии со стандартом. В тексте работы дается в квадратных скобках указание на номер источника и конкретную страницу (или, при необходимости, несколько страниц), например: [67. С. 82-84], при этом в списке под номером 67 может быть указана монография объемом в 387 страниц. Внутритекстовые ссылки к одному и тому же источнику могут даваться многократно. Они экономят место, облегчают набор и форматирование текста.

Сукиасян Э.Р.

***P.S. Считаю своевременным изучение информационного письма студентами, аспирантами и преподавателями.***

***Зав. Кафедрой «Электроэнергетические системы и электротехника», доктор технических наук, профессор ФГОУ ВПО «НГАВТ»***

***В.П. Горелов***

***08.11.08***

**Заключение**

При проектировании, монтаже и эксплуатации электрооборудования судового и другого назначения требуется комплекс знаний в области конструкционных и электротехнических материалов. Это связано с особыми условиями эксплуатации судового электрооборудования с высокой степенью влажности, широким диапазоном изменения температуры, давления, вибрации. Предъявляются жесткие требования в отношении надежности действия, пожарной безопасности, к снижению стоимости. Выбор электротехнических материалов для электрооборудования и приборов возможен только после глубокого анализа основных требований к материалам в реальных эксплуатационных условиях в строгом соответствии с Правилами Речного Регистра, который является органом, осуществляющим технический надзор за всеми морскими и речными судами независимо от их ведомственной принадлежности. Он издает правила, касающиеся постройки и оборудования судов, использования материалов в судостроении.

Развитие морского и речного флота связано с комплексной автоматизацией электрифицированных судов. Для этого применяют новые электротехнические материалы, в основном из органических полимеров, монокристаллов различных веществ.

В последние годы открыты новые виды магнитных, диэлектрических, проводниковых и полупроводниковых материалов, обладающих малоизученными свойствами. На основе этих материалов могут быть изготовлены: принципиально новые электротехнические устройства; многочисленные полупроводниковые приборы; разнообразные нелинейные конденсаторы и резисторы с параметрами, регулируемыми бесконтактными способами; различные сегнетоэлектрические, пьезоэлектрические и пироэлектрические устройства; выпрямители, усилители, стабилизаторы напряжения, преобразователи энергии, запоминающие ячейки; электретные и фотоэлектретные устройства; жидкие кристаллы; термоэлектрические генераторы с высоким КПД; аппаратура голографии и многие другие аппараты и приборы новой техники.

Всё вышеуказанное подчёркивает важность повышения надежности электрооборудования электроэнергетических систем мобильных и стационарных объектов на основе новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками[2,C.11 ].

**Список реферативно использованной литературы согласно [13]**

**1 Богородицкий, Н.П.** Электротехнические материалы: Учебник для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомизат, 1985. – 304 с.

2 **Горелов, С.В.** Технология конструкционных электротехнических материалов [Текст]: учеб. пособие: в 2 кн. Кн.1 /С.В. Горелов [и др.]; под общ. ред. В.П. Горелова, М.Н.Иванова. – 2-е изд. дополн. - Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2005. – 354 с.

3 **Горелов, П.В.** Технология конструкционных электротехнических материалов [Текст]: учеб. пособие: в 2 кн. Кн.2 /П.В. Горелов [и др.]; под ред. В.П. Горелова, Е.В.Ивановой. – 2-е изд., дополн. - Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2005. – 239 с.

4 **Горелов, В.П.** Низкотемпературные нагреватели из композиционных материалов в промышленности и быту. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 208 с.

5 **Горелов, В.П.** Композиционные резисторы для энергетического строительства / В.П. Горелов, Г.А. Пугачёв; Под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.

6 **Лачин, В.И.** Электроника: Учеб. пособие / В.И. Лачин, Н.С. Савелов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д : Феникс, 2002. – 576 с.

7  **Пасынков, В.В.** Материалы электронной техники: Учебник / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – 5-е изд., стер. – СПб: Лань, 2003. – 368 с.

8 **Пейсахов, А.М.** Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник / А.М. Пейсахов, А.М.Кучер. – СПб: Изд-во Михайлова, 2003. – 407 с.

9 **Силенко, В.Н.** Электротехнические материалы и их применение на водном транспорте: Учебник. – СПб.: Политехника, 1995. – 335 с.

10 **Сукиасян, Э.Р.** Ответы на письма в редакцию / Э.Р. Сукиасян // Науч. и техн. б - ки. – 2005. – №6. – с. 85–87.

11 **Таиров, Ю.М.** Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов: Учебник / Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2002. – 424 с.

12 **ГОСТ 2.105 – 95.** Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам. – Взамен ГОСТ 2,105 – 79, ГОСТ 2.906 – 71; введ. 1996 – 07 - 01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 26 с.

13  **ГОСТ 7.1 - 2003.** Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Взамен ГОСТ 7.1 – 84 [и др.]; введен 2004 – 07 – 01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 48 с.

14  **http://www.mitsar.ru/**

15  **http://www.nicostrans.ru/**

16  **http://window.edu.ru/**

**17** **http://sermir.narod.ru/**

**18 http://www.ups-info.ru/**