

5. ДИЭЛЕКТРИКИ. СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Диэлектрики – вещества, обладающие малой электропроводностью, т.к. у них очень мало свободных заряженных частиц – электронов и ионов. Эти частицы появляются в диэлектриках только при нагреве до высоких температур. Существуют диэлектрики газообразные (газы, воздух), жидкие (масла, жидкие органические вещества) и твердые (парафин, полиэтилен, слюда, керамика и т.п.).

При наложении электрического напряжения в диэлектрике, представляющем сложную электрическую систему, протекают разнообразные электрические процессы, связанные с его поляризацией, электрической проводимостью. В случае очень большого напряжения может произойти разрушение диэлектрика, называемое пробоем. Эти процессы определяют свойства диэлектриков, а, следовательно, надежность их работы в радиоустройствах, поэтому рассмотрим эти процессы.

5.1. Поляризация диэлектриков

Происходит вследствие смещения электрических зарядов в диэлектрике атомов, молекул, ионов под действием приложенного напряжения. С поляризацией диэлектрика связана одна из важнейших характеристик - *диэлектрическая проницаемость вещества ϵ* .

Диэлектрическая проницаемость показывает во сколько раз электрическое поле в диэлектрике меньше электрического поля в вакууме и дает возможность судить об интенсивности процессов поляризации и качестве диэлектрика. Поляризация диэлектрика определяется суммарным действием различных механизмов поляризации. Температурная и частотная зависимость диэлектрической проницаемости несут информацию о механизмах поляризации и их относительном вкладе в поляризацию диэлектрика.

Рассматривая явления поляризации необходимо отметить две группы:

- **упругая поляризация**, протекающая практически мгновенно под действием электрического поля, *не сопровождающаяся рассеянием (потерями) энергии* в диэлектрике (выделением теплоты);
- **релаксационная поляризация**, нарастающая и убывающая в течение некоторого промежутка времени и *сопровождающаяся рассеянием энергии* в диэлектрике, т.е. его нагреванием

Различают следующие виды поляризации.

1) Электронная поляризация

При подаче напряжения в диэлектрике создается электрическое поле, и электроны в атомах смещаются относительно ядер к положительному электроду.

Смещенные электроны с положительными зарядами ядер атомов образуют пары связанных друг с другом электрических зарядов, которые называются упругими диполями. Образование их происходит мгновенно (10^{-15} с). Они исчезают, если с

диэлектрика снято напряжение. Этот процесс образования упругих диполей называется *электронной поляризацией*.

Величина ε зависит от концентрации атомов (молекул) в диэлектрике и их структуры, определяющей поляризуемость α_3 атома (молекулы), и описывается выражением:

$$\varepsilon = 1 + n\alpha_3,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; n – концентрация частиц (атомов, молекул) в диэлектрике; α_3 – электронная поляризуемость, определяемая структурой молекулы или атома.

Если диэлектрик кристалл, то у него ε больше, чем у аморфного диэлектрика, т.к. плотность упаковки атомов и молекул больше в кристаллическом состоянии.

Диэлектрическая проницаемость вещества с чисто электронной поляризацией численно равна квадрату показателя преломления света n .

$$\varepsilon = n^2.$$

Хотя деформация электронных орбит не зависит от температуры, электронная поляризация, а, следовательно, диэлектрическая проницаемость ε с увеличением температуры диэлектрика уменьшается, т.к. увеличивается его объем и уменьшается число частиц в единице объема.

2) Ионная поляризация (или поляризация ионного смещения).

Поляризация обусловлена смещением упруго связанных ионов. Характерна для твердых тел с ионным строением, т.е. для кристаллических диэлектриков. Всякий ионный кристалл состоит из положительных и отрицательных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки. При наложении напряжения в нем начинают действовать электрические силы, и ионы смещаются: положительные – в одном направлении, отрицательные – в противоположном. Каждая пара ионов образует упругий диполь. Время установления ионной поляризации 10^{-13} с. Наряду с процессом поляризационного смещения протекает электронная поляризация. Интенсивность этих процессов у кристаллических диэлектриков велика, поэтому больше $\varepsilon = 7 \div 12$ и выше.

Электронная и ионная поляризации относятся к упругой поляризации. Остальные, рассматриваемые далее, являются различными проявлениями релаксационной поляризации.

3) Дипольная релаксационная поляризация (ориентационная).

Поляризация определяется поворотом и ориентацией диполей в направлении поля и связана с тепловым движением частиц.

Диэлектрик может состоять из полярных молекул. Такая молекула состоит из положительных и отрицательных ионов и ее *дипольный электрический момент*

$$\mu = q \cdot l,$$

q – заряд одного из ионов; l – расстояние между центрами ионов. Такая система зарядов называется твердым *диполем*, а диэлектрик, состоящий из полярных молекул – *полярным*.

Дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации. Поворот диполей в направлении поля протекает в вязкой среде и связан с совершением работы по преодолению сил вязкого сопротивления среды, поэтому дипольная поляризация связана с потерями энергии

Под действием поля ориентируются и радикалы (группы атомов) – это *дипольно – радикальная поляризация*.

С увеличением температуры вязкость среды уменьшается, и дипольная поляризация возрастает, пока велика вязкость. Но постепенно нарастает хаотичность теплового движения и становится преобладающей над ориентацией диполей, т.е. дипольная ориентация с ростом температуры начинает падать.

Эта поляризация свойственна газам и жидкостям, а также твердым полярным органическим веществам, имеющим в составе радикалы. Совершается за время 10^{-2} с. После снятия поля ориентация ослабевает (происходит релаксация).

4) **Электронно – релаксационная поляризация.**

Поляризация возникает за счет возбужденных тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или дырок. Характерна для диэлектриков с высоким показателем преломления и электронной электропроводностью, а также полупроводников.

5) **Упруго – дипольная поляризация**

Поляризация наблюдается у дипольных молекул некоторых кристаллов, закрепленных и только ограниченно поворачивающихся на небольшой угол.

6) **Междуслойная поляризация**

Поляризация обусловлена проводящими и полупроводящими включениями и наличием слоев с различной проводимостью. Поляризация проявляется в твердых телах неоднородной структуры (слоистые пластики) в области низких частот, и связана со значительными потерями электрической энергии.

7) **Самопроизвольная (спонтанная) поляризация**

Поляризация характерна для сегнетоэлектриков, веществ, разбивающихся на области (*домены*), обладающие спонтанным дипольным моментом в отсутствие внешнего поля. Взаимная ориентация дипольных моментов доменов в отсутствие поля такова, что суммарный дипольный момент вещества равен нулю. Наложение поля ориентирует дипольные моменты доменов, что вызывает очень сильную поляризацию. Поляризация нелинейно зависит от напряжения электрического поля и достигает насыщения при некотором значении напряженности электрического поля. Поэтому диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика нелинейно зависит от напряженности электрического поля, достигая максимума при определенном его значении. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости также имеет один или несколько максимумов при определенных температурах

(титанаты бария и стронция). Спонтанная поляризация в сегнетоэлектриках проявляется в определенной области температур, исчезая выше некоторой температуры, называемой *температурой Кюри*. При этой температуре в сегнетоэлектрике наблюдается *фазовый переход второго рода*, т.е. изменяется тип кристаллической структуры.

8) Остаточная поляризация

Поляризация существует длительное время в диэлектрике после снятия напряжения. Этот тип поляризации наблюдается в электретах. Обладает сильной зависимостью от напряженности электрического поля и температуры.

5.2. Диэлектрическая проницаемость веществ

Газы

Поляризация газа может быть чисто электронной или дипольной, если молекулы газа обладают дипольным моментом.

Газы имеют малые плотности из-за больших расстояний между молекулами. Поэтому поляризация газов незначительная и диэлектрическая проницаемость газов ϵ при нормальном давлении близка к 1.

Диэлектрическая проницаемость газов растет с ростом радиуса молекулы, поскольку из-за роста радиуса возрастает [поляризуемость](#) молекулы. Зависимость диэлектрической проницаемости газов от давления p и температуры T определяется изменением концентрации молекул n .

$$p = nkT.$$

Здесь k - постоянная Больцмана.

Жидкие диэлектрики

Для неполярных жидкостей ϵ невелика и близка к значению квадрата показателя преломления света n

$$\epsilon = n^2$$

Для нейтральных жидкостей ϵ уменьшается с ростом температуры, что связано с уменьшением плотности жидкости с ростом температуры, а, значит, и уменьшением концентрации молекул.

Для бензола, толуола $\epsilon = n^2 \approx 2$.

В дипольных (полярных) жидкостях одновременно протекают и электронная, и дипольно – релаксационная поляризации. ϵ тем больше, чем больше электрический

момент диполей μ и чем больше число молекул в единице объема. Диэлектрическая проницаемость полярных жидкостей больше чем у неполярных. Например, ϵ касторового масла = 4,5.

Температурная зависимость ϵ полярных жидкостей характеризуется дипольным максимумом в области резкого изменения вязкости жидкости. С ростом частоты электрического поля диэлектрическая проницаемость полярных жидкостей снижается до значений, определяемых электронной поляризацией.

$$\epsilon(\omega)_{\omega \rightarrow \infty} = n^2$$

Твердые диэлектрики

В твердых диэлектриках возможны все виды поляризации.

Для нейтральных диэлектриков $\epsilon = n^2$, что подтверждается ниже приведенными результатами для неполярных диэлектриков при температуре 20 °С.

диэлектрик	n	n^2	ϵ
парафин	1,43	2,06	2,0 – 2,2
полиэтилен	1,52	2,30	2,3 – 2,4
полистирол	1,55	2,40	2,4 – 2,6
сера	1,92	3,69	3,6 – 4,0
фторопласт	1,37	1,89	1,9 – 2,2
алмаз	2,40	5,76	5,6 – 5,8

Ионные кристаллы с плотной упаковкой частиц обладают электронной и ионной поляризацией. ϵ изменяется в широких диапазонах. С ростом температуры ϵ обычно растет. В неорганических аморфных диэлектриках (стеклах) ϵ изменяется в пределах от 4 до 20, возрастает с ростом температуры, хотя в ряде случаев (рутил TiO_2 , титанат кальция CaTiO_3) может и уменьшаться.

Органические полярные диэлектрики имеют дипольно – релаксационную поляризацию. ϵ изменяется в широких пределах, но обычно имеет значение 4 – 10. Диэлектрическая проницаемость зависит от температуры, частоты приложенного напряжения, подчиняясь, в целом, закономерностям, проявляющимся у полярных жидкостей.

5.3. Электропроводность диэлектриков.

Любой радиотехнический материал – проводник, полупроводник или диэлектрик – проводит электрический ток. Но в диэлектриках протекают токи очень малой величины, если даже они находятся под воздействием большого напряжения (500 В и выше).

Электрический ток в диэлектриках – это направленное движение электронов и ионов: положительных и (или) отрицательных ионов.

Основные виды электропроводности диэлектриков

1. Абсорбционные токи

Абсорбционными токами называются токи смещения различных видов замедленной поляризации. Абсорбционные токи при постоянном напряжении протекают в диэлектрике до момента установления равновесного состояния, изменяя свое направление при включении и выключении напряжения. При переменном напряжении абсорбционные токи протекают в течение всего времени нахождения диэлектрика в электрическом поле.

В общем случае электрический ток \mathbf{j} в диэлектрике представляет собой сумму сквозного тока $\mathbf{j}_{\text{ск}}$ и тока абсорбции $\mathbf{j}_{\text{аб}}$

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_{\text{ск}} + \mathbf{j}_{\text{аб}}$$

Ток абсорбции можно определить через ток смещения $\mathbf{j}_{\text{см}}$ - скорость изменения вектора электрической индукции \mathbf{D}

$$\bar{\mathbf{j}}_{\text{см}} = \frac{\partial \bar{\mathbf{D}}}{\partial t} \approx \bar{\mathbf{j}}_{\text{аб}}$$

Сквозной ток определяется переносом (движением) в электрическом поле различных носителей заряда.

2. Электронная электропроводность характеризуется перемещением электронов под действием поля. Кроме металлов она присутствует у углерода, оксидов металлов, сульфидов и др. веществ, а также у многих полупроводников.

3. Ионная – обусловлена движением ионов. Наблюдается в растворах и расплавах электролитов – солей, кислот, щелочей, а также во многих диэлектриках. Она подразделяется на собственную и примесную проводимости. Собственная проводимость обусловлена движением ионов, получаемых при диссоциации¹ молекул. Движение ионов в электрическом поле сопровождается электролизом² – переносом вещества между электродами и выделением его на электродах. Полярные жидкости диссоциированы в большей степени и имеют большую электропроводность, чем неполярные.

В неполярных и слабополярных жидких диэлектриках (минеральные масла, кремнийорганические жидкости) электропроводность определяется примесями.

¹ Электролитическая диссоциация – расщепление молекул вещества на положительные ионы – катионы и отрицательные ионы – анионы.

² Электролиз – химический процесс, протекающий на электродах под действием постоянного электрического тока, проходящего через электрохимическую систему из двух электродов и электролита.

4. Молионная электропроводность – обусловлена движением заряженных частиц, называемых *молионами*. Наблюдают ее в коллоидных системах, эмульсиях³, суспензиях⁴. Движение молионов под действием электрического поля называют *электрофорезом*. При электрофорезе, в отличие от электролиза, новых веществ не образуется, меняется относительная концентрация дисперсной фазы в различных слоях жидкости. Электрофоретическая электропроводность наблюдается, например, в маслах, содержащих эмульгированную воду.

5.4. Электропроводность газов

Газы обладают малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть при наличии в них ионов или свободных электронов, что возможно под воздействием внешних и внутренних ионизирующих факторов: космическое, рентгеновское или радиоактивное излучение, тепловое воздействие, соударение заряженных частиц с молекулами.

Электропроводность газа, обусловленная действием внешних ионизаторов и исчезающая после прекращения его действия называется *несамостоятельной*. А электропроводность, обусловленная ударной ионизацией и не исчезающая после прекращения действия внешнего ионизатора, называется *самостоятельной*. В слабых полях, в которых ударная ионизация отсутствует, самостоятельная электропроводность не наблюдается.

В слабых полях в газах выполняется закон Ома, ток линейно меняется с величиной приложенного напряжения. При более высоких напряженностях электрического поля вплоть до возникновения ударной ионизации наблюдается ток насыщения, величина которого не зависит от величины поля. В полях, величина которых достаточна для ионизации газа при столкновении частиц, наступает пробой газа.

5.5. Электропроводность жидких диэлектриков

Электропроводность жидких диэлектриков зависит от многих факторов: строения молекул, температуры, наличия примесей, наличия крупных заряженных коллоидных частиц и других факторов.

Электропроводность неполярных жидкостей зависит от наличия диссоциированных примесей и влаги. В полярных жидкостях электропроводность создается кроме примесей диссоциированными ионами самой жидкости. Полярные жидкости обладают повышенной проводимостью по сравнению с неполярными. С повышением диэлектрической проницаемости проводимость возрастает. Очистка жидкостей от примесей уменьшает их проводимость.

Удельная проводимость жидкого диэлектрика экспоненциально зависит от температуры и выражается уравнением

³ Эмульсия – дисперсная система, в которой одна жидкость раздроблена в другой, не растворяющей ее жидкости.

⁴ Суспензия – низкодисперсная система твердых частиц в жидкости, а предельно-высокодисперсные системы называются коллоидными растворами.

$$\gamma = A \exp\left(-\frac{a}{T}\right),$$

где A и a – постоянные, характеризующие жидкость.

Рост проводимости жидкости с ростом температуры вызывается уменьшением ее вязкости, приводящим к возрастанию подвижности ионов, и ростом степени диссоциации.

В области слабых полей ток в жидких диэлектриках описывается законом Ома. В отличие от газов в зависимости тока от напряжения жидкого диэлектрика обычно отсутствует участок насыщения, хотя он может появиться при высокой степени очистки жидкости. В области высоких полей, превышающих 10 – 100 МВ/м, закон Ома нарушается в результате увеличения числа ионов, движущихся под влиянием поля.

5.6. Электропроводность твердых диэлектриков

Обусловлена, как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов примесей, а у некоторых материалов и наличием свободных электронов. Электронная электропроводность наблюдается при сильных электрических полях. При низких температурах передвигаются слабо закрепленные ионы и ионы примесей, а при высоких температурах движутся термически освобождаемые ионы кристаллической решетки. Ионная электропроводность, в отличие от электронной, сопровождается переносом вещества.

Температурная зависимость удельной проводимости твердых диэлектриков описывается выражением

$$\gamma = A \exp\left(-\frac{W}{kT}\right),$$

где W – энергия активации носителей заряда, k – постоянная Больцмана.

Для каменной соли энергия активации ионов натрия 0,85 эВ, ионов хлора 2,5 эВ, электронов 6,0 эВ.

Кристаллы с одновалентными ионами, например NaCl, обладают большей проводимостью по сравнению с кристаллами с многовалентными ионами MgO, Al₂O₃.

При больших напряженностях (выше 10 - 100 МВ/м) электрического поля в кристаллическом диэлектрике появляется значительный электронный ток, быстро возрастающий с ростом напряженности поля, приводящий к нарушению закона Ома.

5.7. Физико – механические и химические свойства диэлектриков

При выборе изоляционного материала приходится учитывать не только электрические свойства, но и влажностные, тепловые, химические, механические свойства, химическую стойкость и активность диэлектрика его тропикостойкость и радиационную стойкость.

Влажностные свойства диэлектриков

Влагостойкость – это надежность эксплуатации изоляции при нахождении ее в атмосфере водяного пара близкого к насыщению. Влагостойкость оценивают по изменению электрических, механических и других физических свойств после нахождения материала в атмосфере с повышенной и высокой влажностью; по влаго- и водопроницаемости; по влаго- и водопоглощаемости.

Влагопроницаемость – способность материала пропускать пары влаги при наличии разности относительных влажностей воздуха с двух сторон материала.

Водопоглощаемость – способность материала сорбировать воду при длительном нахождении во влажной атмосфере близкой к состоянию насыщения.

Водопоглощаемость – способность материала сорбировать воду при длительном погружении его в воду.

Тропикостойкость и тропикализация оборудования – защита электрооборудования от влаги, плесени, грызунов.

Тепловые свойства диэлектриков

Для характеристики тепловых свойств диэлектриков используются следующие величины.

Нагревостойкость – способность электроизоляционных материалов и изделий без вреда для них выдерживать воздействие высокой температуры и резких смен температуры. Определяют по температуре, при которой наблюдается существенное изменение механических и электрических свойств, например, в органических диэлектриках начинается деформация растяжения или изгиба под нагрузкой.

Теплопроводность – процесс передачи тепла в материале. Характеризуется экспериментально определяемым коэффициентом теплопроводности λ_T . λ_T – количество теплоты, переданной за одну секунду через слой материала толщиной в 1 м и площадью поверхности – 1 м² при разности температур поверхностей слоя в 1 °К. Коэффициент теплопроводности диэлектриков изменяется в широких пределах. Самые низкие значения λ_T имеют газы, пористые диэлектрики и жидкости (для воздуха $\lambda_T = 0,025$ Вт/(м·К), для воды $\lambda_T = 0,58$ Вт/(м·К)), высокие значения имеют кристаллические диэлектрики (для кристаллического кварца $\lambda_T = 12,5$ Вт/(м·К)). Коэффициент теплопроводности диэлектриков зависит от их строения (для плавленого кварца $\lambda_T = 1,25$ Вт/(м·К)) и температуры.

Тепловое расширение диэлектриков оценивают температурным коэффициентом

$$\text{TKI} = \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial l}{\partial t}, \quad \frac{1}{\text{град}}$$

линейного расширения: . Материалы с малым тепловым расширением, имеют, как правило, более высокую нагревостойкость и наоборот. Тепловое расширение органических диэлектриков значительно (в десятки и сотни раз) превышает расширение неорганических диэлектриков. Поэтому стабильность размеров деталей из неорганических диэлектриков при колебаниях температуры значительно выше по сравнению с органическими.

Радиационная стойкость диэлектриков

Современная техника может подвергаться воздействию корпускулярных или волновых излучений высокой энергии, которое изменяет физические и химические свойства материалов. Степень стойкости физико-химических свойств материала, степень сохранения ими электрических, механических и других свойств к воздействию излучения называется *радиационной стойкостью*.

Взаимодействие излучения с веществом зависит от природы вещества и излучения. Рассеяние энергии излучения происходит в основном за счет ионизации (внутренний фотоэффект), возбуждения атомов, комптоновского рассеяния, при очень больших энергиях из-за ядерных преобразований. Часть энергии излучения расходуется на выбивание атомов в междоузлия, т.е. на создание дефектов структуры – вакансий и междоузельных атомов, в основном в поверхностном слое материала. Но воздействие излучений, обладающих большой длиной пробега частиц, например, нейтронов, вызывает нарушение структуры по всему объему облучаемого материала.

Воздействие излучения может сопровождаться химическими превращениями - разрываются и перемещаются химические связи, образуются свободные радикалы. Так в органических полимерах происходит выделение газов, образование и ликвидация двойных связей, полимеризация образование поперечных связей, вулканизация. Химические превращения сопровождаются изменением физических свойств материала.

Стойкие к воздействию излучения материалы должны:

- должны обладать способностью поглощать энергию без чрезмерной ионизации;
- способностью в большей степени образовывать двойные связи, чем обнаруживать разрыв связей.

Наиболее стойкими к облучению неорганическими диэлектриками являются: кварц, слюда, глинозем, оксид циркония оксид бериллия и слюдяные материалы со стекловидным связующим. Воздействие излучения приводит у них к снижению удельного сопротивления и электрической прочности, После прогрева облученных неорганических диэлектриков при высоких температурах (отжига) у них возможно восстановление первоначальных свойств.

Изучение влияния радиоактивного излучения на органические полимеры: полиэтилен, полистирол, синтетический и натуральный каучуки и др. – показывает, что **ароматические соединения**⁵ проявляют большую стойкость к действию радиации по сравнению с **алифатическими соединениями**⁶. Полагают, что бензольные кольца⁷ поглощают значительную часть радиоактивного излучения без деструкции. В результате повышается радиационная устойчивость соединений с бензольными кольцами (полистирол) по сравнению с полимерами алифатического ряда без бензольных колец (полиэтилен, фторопласт). Наименее устойчивы к действию радиации **полидиметилсилоксаны**⁸. Фенильные группы⁹ в полимерах увеличивают стойкость к радиации.

5.8. Электроизоляционные материалы

Электроизоляционные материалы классифицируются по:

- агрегатному состоянию – газообразные, жидкие, твердые и твердеющие (лаки, компаунды) материалы;
- по химической природе – органические, неорганические, элементоорганические материалы.

5.8.1. Газообразные диэлектрики

Воздух и газы являются идеальными диэлектриками до процесса их ионизации. При ионизации космической радиацией, нагревом их электроизоляционные свойства резко снижаются.

Электрическая прочность воздуха при нормальном давлении 2,1 МВ/м. Электрическая прочность воздуха заметно зависит от частоты электрического поля. Воздух при высоком давлении превосходит по электрической прочности такие диэлектрики, как фарфор и трансформаторное масло.

5.8.2. Жидкие диэлектрики

Подразделяются на 3 группы:

- 1) нефтяные масла;

⁵ *Ароматические соединения* – это соединения с замкнутой цепью атомов углерода, характеризующиеся особой циклической группировкой из шести атомов углерода – *бензольного ароматического ядра* с особыми химическими свойствами, называемыми *ароматическими*.

⁶ *Алифатические соединения* – это соединения с разомкнутой цепью атомов углерода и водорода – нециклические углеводороды, называемые алканами.

⁷ *Бензольное кольцо* - циклическая группировка из шести атомов углерода.

⁸ *Полидиметилсилоксаны* – жидкий кремнийорганический полимер линейного строения, содержащий повторяющуюся силоксановую группу атомов из кремния и кислорода.

⁹ *Фенильная группа* (фенил) – одновалентный радикал бензола C_6H_5 , образующийся при отнятии атома водорода от любого атома углерода бензольного ядра.

- 2) синтетические жидкости;
- 3) растительные масла.

Жидкие диэлектрики используют для пропитки кабелей высокого напряжения, конденсаторов, для заливки трансформаторов, выключателей и вводов. Кроме этого они выполняют функции теплоносителя в трансформаторах, дугогасителя в выключателях и др.

Нефтяные масла

Нефтяные масла представляют собой смесь углеводородов парафинового (C_nH_{2n+2}) и нафтенового (C_nH_{2n}) рядов. Они широко применяются в электротехнике в качестве трансформаторного, кабельного и конденсаторного масел. Масло, заполняя промежутки и поры внутри электротехнических установок и изделий, повышает электрическую прочность изоляции и улучшает теплоотвод от изделий.

Трансформаторное масло получают из нефти путем перегонки. Электрические свойства трансформаторного масла в значительной степени зависят от качества очистки масла от примесей, содержания в нем воды и степени обезгаживания. Диэлектрическая проницаемость масла 2,2, удельное электрическое сопротивление 10^{13} Ом·м.

Назначение трансформаторных масел – повышать электрическую прочность изоляции; отводить тепло; способствовать дугогашению в масляных выключателях, улучшать качество электроизоляции в электротехнических изделиях: реостатах, бумажных конденсаторах, кабелях с бумажной изоляцией, силовых кабелях - путем заливки и пропитки.

Трансформаторное масло в процессе эксплуатации стареет, что ухудшает его качество. Старению масла способствуют: контакт масла с воздухом, повышенные температуры, соприкосновение с металлами (Cu, Pb, Fe), воздействие света. Для увеличения срока службы масло регенерируют очисткой и удалением продуктов старения, добавлением ингибиторов.

Кабельное и конденсаторное масла отличаются от трансформаторного более высоким качеством очистки.

Синтетические жидкие диэлектрики

Синтетические жидкие диэлектрики по некоторым свойствам превосходят нефтяные электроизоляционные масла.

Хлорированные углеводороды

Совол – пентахлордифенил $C_6H_2Cl_3 - C_6H_3Cl_2$, получают при хлорировании дифенила $C_{12}H_{10}$



Совол применяется для пропитки и заливки конденсаторов. Обладает более высокой по сравнению с нефтяными маслами диэлектрической проницаемостью. Диэлектрическая проницаемость совола 5,0, удельное электрическое сопротивление $10^{11} \div 10^{12}$ Ом·м. Применяется совол для пропитки бумажных силовых и радиоконденсаторов с повышенной удельной емкостью и невысоким рабочим напряжением.

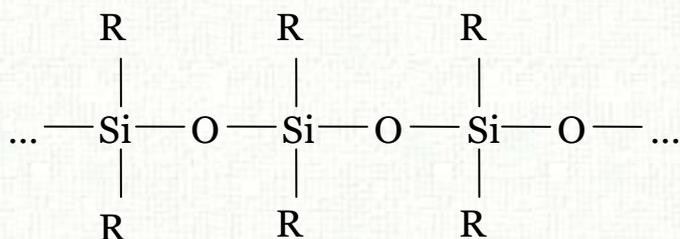
Совтол – смесь совола с трихлорбензолом. Используется для изоляции взрывобезопасных трансформаторов.

Кремнийорганические жидкости

Наибольшее распространение имеют *полидиметилсилоксановые, полидиэтилсилоксановые, полиметилфенилсилоксановые* жидкости.

Полисилоксановые жидкости – жидкие кремнийорганические полимеры (*полиорганосилоксаны*), обладают такими ценными свойствами как: высокая нагревостойкость, химическая инертность, низкая гигроскопичность, низкая температура застывания, высокие электрические характеристики в широком интервале частот и температур.

Жидкие полиорганосилоксаны представляют собой полимерные соединения с низкой степенью полимеризации, молекулы которых содержат силоксанную группировку атомов



где атомы кремния связаны с органическими радикалами R: метилом CH_3 , этилом C_2H_5 , фенилом C_6H_5 . Молекулы полиорганосилоксановых жидкостей могут иметь линейную, линейно-разветвленную и циклическую структуру.

Жидкие полиметилсилоксаны получают при гидролизе *диметилдихлорсилана* в смеси с *триметилхлорсиланом*.

Образующиеся жидкости бесцветны, растворяются в ароматических углеводородах, дихлорэтано и ряде других органических растворителей, не растворяются в спиртах и ацетоне. Полиметилсилоксаны химически инертны, не оказывают агрессивного действия на металлы и не взаимодействуют с большинством органических диэлектриков и резин. Диэлектрическая проницаемость $2,0 \div 2,8$, удельное электрическое сопротивление 10^{12} Ом·м, электрическая прочность $12 \div 20$ МВ/м

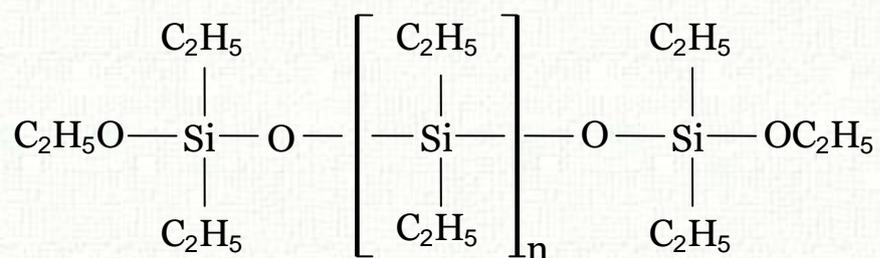
Формула *полидиметилсилоксана* имеет вид



Жидкие кремнийорганические полимеры находят применение как:

- 1) смазочные масла и смазки;
- 2) гидрофобизация;
- 3) при литье металлов для смазки форм;
- 4) диэлектрик для пропитки бумажных конденсаторов;
- 5) амортизационные и гидравлические масла;
- 6) масла для конденсационных насосов.

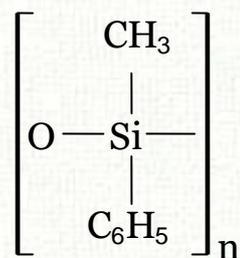
Полидиэтилсилоксаны – получают при гидролизе¹⁰ *диэтилдихлорсилана* и *триэтилхлорсилана*. Имеют широкий интервал температур кипения. Строение выражается формулой:



Свойства зависят от температуры кипения. Электрические свойства совпадают со свойствами полидиметилсилоксана.

Жидкие *полиметилфенилсилоксаны* имеют строение, выражаемое формулой

¹⁰ *Гидролиз* – реакция взаимодействия вещества с водой с образованием гидроксида одного из них и гидроксида другого $\text{PCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{P}(\text{OH})_3 + 3\text{HCl}$. В реакциях гидролиза более отрицательный элемент соединяется с водородом, а менее отрицательный - с гидроксильной группой.



Получают гидролизом фенилметилдихлорсиланов и др. Масло вязкое. После обработки NaOH вязкость повышается в 3 раза. Выдерживает нагрев в течение 1000 час до 250 °С. Электрические свойства совпадают со свойствами полидиметилсилоксана.

При γ – облучении вязкость кремнийорганических жидкостей сильно возрастает, а диэлектрические характеристики резко ухудшаются. При большой дозе облучения жидкости превращаются в каучукоподобную массу, а затем в твердое хрупкое тело.

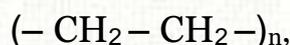
Фторорганические жидкости

Фторорганические жидкости – C_8F_{16} – негорючи и взрывобезопасны, высоконагревостойки (200 °С), обладают малой гигроскопичностью. Пары их имеют высокую электрическую прочность. Жидкости имеют низкую вязкость, летучи. Обладают лучшим теплоотводом, чем нефтяные масла и кремнийорганические жидкости.

5.8.3. Органические полимерные материалы

Полиэтилен

Полиэтилен, структурная формула которого имеет вид



представляет собой неполярный полимер линейной структуры. Получается полимеризацией газа этилена C_2H_4 при высоком давлении (до 300 МПа), либо при низком (до 0,6 МПа). Молекулярная масса полиэтилена высокого давления – 18000 – 40000, низкого – 60000 – 800000.

Молекулы полиэтилена обладают способностью образовывать участки материала с упорядоченным расположением цепей (кристаллитов), поэтому полиэтилен состоит из двух фаз (кристаллической и аморфной), соотношение которых определяет его механические и тепловые свойства. Аморфная придает материалу эластичные свойства, а кристаллическая – жесткость. Аморфная фаза имеет температуру стеклования +80 °С. Кристаллическая фаза обладает более высокой нагревостойкостью.

Агрегаты молекул полиэтилена кристаллической фазы представляют собой сферолиты с орторомбической структурой. Содержание кристаллической фазы (до 90 %) в полиэтилене низкого давления выше, чем в полиэтилене высокого давления (до 60 %). Благодаря высокой кристалличности полиэтилен низкого давления имеет более высокую температуру плавления (120 -125 °С) и более высокую прочность при растяжении. Структура полиэтилена в значительной степени зависит от режима охлаждения. При его быстром охлаждении образуются мелкие сферолиты, при медленном охлаждении – крупные. Быстро охлажденный полиэтилен отличается большой гибкостью и меньшей твердостью.

Свойства полиэтилена зависят от молекулярного веса, чистоты, посторонних примесей. Механические свойства зависят от степени полимеризации. Полиэтилен обладает большой химической стойкостью. Как электроизоляционный материал широко применяется в кабельной промышленности и в производстве изолированных проводов.

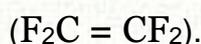
В настоящее время изготавливаются следующие виды полиэтилена и полиэтиленовых изделий:

1. полиэтилен низкого и высокого давления - (н.д.) и (в.д.);
2. полиэтилен низкого давления для кабельной промышленности;
3. полиэтилен низкомолекулярный высокого или среднего давления;
4. пористый полиэтилен;
5. полиэтиленовый специальный шланговый пластикат;
6. полиэтилен для производства ВЧ кабеля;
7. электропроводящий полиэтилен для кабельной промышленности;
8. полиэтилен, наполненный сажой;
9. хлорсульфированный полиэтилен;
10. пленка полиэтиленовая.

Фторопласты

Существует несколько видов фторуглеродных полимеров, которые могут быть полярными и неполярными.

Рассмотрим свойства продукта реакции полимеризации газа тетрафторэтилена



Фторопласт – 4 (политетрафторэтилен) – рыхлый порошок белого цвета. Структура молекул имеет вид

