# 4 ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электроизоляционные материалы окружают и отделяют друг от друга токоведущие части электрических устройств, элементы схемы или конструкции, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Изоляция обкладок конденсаторов позволяет получать требуемые значения электрической ёмкости.

Для изоляции применяют газы, жидкости и твёрдые вещества. По химическому составу электроизоляционные материалы подразделяют на: органические, элементоорганические и неорганические. Твёрдые материалы классифицируют на основе особенностей их строения. Это полимеры и эластомеры (каучуки), волокна (пропитанные), лаки и компаунды, стёкла, кристаллы и плёнки, а также композиции диэлектриков волокнистого и кристаллического строения с аморфным связующим.

Под действием электрического поля диэлектрик поляризуется, кроме того, через него протекает небольшой ток сквозной проводимости. От этого тока, но в основном от потерь энергии при замедленных видах поляризации, диэлектрик нагревается, что может привести к пробою. Пробой возможен также в результате ударной ионизации и электрохимического старения.

## 4.1 Сопротивление изоляции и электропроводность диэлектриков

В диэлектрике различают токи сквозной проводимости и токи смещения связанных зарядов (при замедленных видах поляризации их называют токами абсорбции, от лат. absorbeo – поглощаю). Сумма токов сквозной проводимости и абсорбции называется током утечки.

*Сопротивление изоляции RISO* определяется законом Ома:

*RISO* = *U*ИЗМ **/** *I*СКВ,

где *RISO* – сопротивление изоляции, Ом;  
 *U*ИЗМ  – постоянное напряжение измерения, В;  
 *I*СКВ – сквозной ток утечки, А.

*Электропроводность диэлектрика* характеризуется только током сквозной проводимости. Для исключения токов абсорбции её измеряют при постоянном напряжении через 1 минуту после его подачи (за это время токи абсорбции спадают практически до нуля).

Электропроводность диэлектриков возрастает при нагреве и повышении влажности. У твёрдых материалов различают объёмную и поверхностную электропроводность. Для численной оценки качества изоляционных материалов можно использовать значения его удельной электрической проводимости – объёмной γ*V*, См/м (сименс, делённый на метр), и поверхностной γ*s*, См. На практике чаще используют обратные величины – удельные объёмное ρ*V* и поверхностное ρ*s* электрические сопротивления.

*Удельное объёмное электрическое сопротивление* ρ*V,* Ом·м (ом, умноженный на метр), численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно выделенного из исследуемого материала, если ток проходит от одной грани этого куба к противоположной.

*Удельное поверхностное электрическое сопротивление* ρ*s*, Ом, численно равно сопротивлению квадрата любых размеров, мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит от одной стороны этого квадрата к противоположной.

При длительной работе под напряжением сквозной ток через твёрдые или жидкие диэлектрики с течением времени может изменяться – уменьшаться или увеличиваться. Уменьшение сквозного тока со временем говорит о том, что электропроводность материала обусловлена ионами посторонних примесей, она уменьшается за счёт электрической очистки образца. Увеличение тока со временем свидетельствует об участии в нём зарядов, которые являются структурными элементами самого материала и о протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения, способном постепенно привести к разрушению – пробою диэлектрика.

*Электропроводность газов* при небольших значениях напряжённости электрического поля пренебрежимо мала. Поэтому воздух можно рассматривать как совершенный диэлектрик, до тех пор, пока не создадутся условия для ударной ионизации.

*Электропроводность жидких диэлектриков* тесно связана со строением молекул жидкости. В *неполярных* жидкостях электропроводность определяется наличием диссоциированных примесей, в том числе влаги (от лат. *dissociatio* — разъединение). Очистка неполярных жидких диэлектриков от примесей заметно повышает их сопротивление. В *полярных* жидкостях электропроводность зависит не только от примесей; иногда она вызывается диссоциацией молекул самой жидкости. С увеличением температуры возрастает степень диссоциации и подвижность ионов, а следовательно, и электропроводность. Полярные жидкости по сравнению с неполярными всегда имеют повышенную проводимость, чем больше диэлектрическая проницаемость, тем выше проводимость. *Сильнополярные* жидкости отличаются настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью.

*Электропроводность твёрдых диэлектриков* обусловлена как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а в сильных полях – также движением электронов. Собственная электропроводность твёрдых тел, её зависимость от температуры определяются структурой вещества и его составом. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей удельной проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. В анизотропных кристаллах удельная проводимость неодинакова по разным осям. Например, в кварце удельная проводимость в направлении, параллельном главной оси, примерно, в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном этой оси. В кристаллических телах с молекулярной решёткой (сера, алмаз) проводимость мала и определяется примесями. Проводимость твёрдых *пористых* диэлектриков значительно увеличивается при наличии в них влаги. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление, но под воздействием влажной среды сопротивление вновь уменьшается. Для уменьшения гигроскопичности (поглощения влаги) и влагопроницаемости пористые изоляционные материалы подвергают пропитке.

*Поверхностная электропроводность* твёрдых диэлектриков обусловлена наличием влаги, загрязнением и различными дефектами поверхности диэлектрика. Вода обладает значительной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы обнаружить заметную электропроводность, которая определяется в основном толщиной этого слоя. Однако поскольку сопротивление адсорбированной плёнки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, удельную поверхностную проводимость обычно рассматривают как характеристику самого диэлектрика.

Наличие загрязнения относительно мало сказывается на поверхностной проводимости гидрофобных диэлектриков (от гидро... и греч. *phobos* – страх, боязнь). Это неполярные диэлектрики, чистая поверхность которых неспособна смачиваться водой. Однако загрязнения сильно влияют на проводимость гидрофильных диэлектриков. (от гидро... и греч. *phileo* – люблю). К ним относят ионные и полярные диэлектрики со смачиваемой поверхностью, особенно если они частично растворимы в воде. Под действием воды на поверхности таких диэлектриков образуется плёнка электролита. Высокой поверхностной проводимостью обладают также объёмно-пористые материалы, в них процесс поглощения влаги в глубь материала стимулирует образование плёнки на его поверхности.

С целью уменьшения поверхностной электропроводности материала применяют различные приёмы очистки его поверхности – промывку спиртом и водой, кипячение в дистиллированной воде. Для сохранения поверхностного сопротивления изделий из керамики и стёкол в условиях высокой влажности, их покрывают плёнками гидрофобных (водоотталкивающих) кремнийорганических лаков.

При постоянном напряжении качество изоляционного материала характеризуется значениями удельных объёмного ρ*V* и поверхностного ρ*s* сопротивлений. Потери энергии, вызванные протеканием малых постоянных токов сквозной проводимости, невелики.

## 4.2 Поляризация диэлектриков и диэлектрические потери

Поляризацией вещества называют смещение связанных зарядов.

Поляризация возникает под действием внешнего электрического поля, однако у сегнетоэлектриков наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризация, а пьезоэлектрики могут поляризоваться под действием механических напряжений.

Различают несколько механизмов поляризации, для их моделей применяют резисторы и конденсаторы как показано на рисунке 4.1, *а*.

Элементы, соответствующие необязательным механизмам поляризации и потерь, показаны пунктиром.

Ёмкость *С*0 соответствует конденсатору, между обкладками которого вакуум. Резистор *r*пр соответствует потерям энергии от токов сквозной проводимости (эти потери не зависят от частоты приложенного напряжения, а с ростом температуры возрастают по экспоненциальному закону).

ω

*C*0

*r*пр

*C*э

*C*и

*C*др

*r*др

*C*эр

*r*м

*C*м

*r*рез

*C*рез

*C*сп

*r*эр

*r*и

*r*ир

*C*ир

↑

*U*

~

↓

*r*сп

*C*

*r*

*U*

*U/ R*

*U*ω*C*

*I*

δ

↑

*U*

~

↓

*U/ R*

*I*

*U*ω*C*

*в*)

*б* )

*а*)

φ

Рисунок 4.1 – Поляризация диэлектрика: а – моделирование механизмов поляризации и потерь; б – схема замещения; в – векторная диаграмма

*Электронная*поляризация (*С*э) представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Происходит мгновенно (за время около 10–15с) и без потери энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков. Значение диэлектрической проницаемости вещества с чисто электронной поляризацией, численно равно квадрату показателя преломления света.

*Ионная*поляризация (*С*и) характерна для твёрдых тел с ионным строением и обусловлена упругим смещением связанных ионов на расстояния, меньшие периода решётки. Происходит быстро (за время около 10–13 с) и без потери энергии.

*Дипольно-релаксационная* поляризация (*С*др, *r*др) свойственна полярным жидкостям и представляет собой замедленный поворот дипольных молекул в направлении электрического поля, что требует преодоления некоторого противодействия. Поэтому дипольно-релаксационная поляризация связана с потерями энергии и нагревом диэлектрика, это отражено на рисунке 4.1, *а* в виде последовательно включённого с конденсатором *C*др активного сопротивления *r*др. После снятия электрического поля ориентация частиц постепенно ослабевает вследствие теплового движения. Время релаксации – это промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных диполей уменьшается в *е ≈* 2,7 раза. При нагреве молекулярные силы ослабляются, что должно облегчить дипольно-релаксационную поляризацию. Однако в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому зависимость диэлектрической проницаемости **ε** от температуры характеризуется наличием максимума.

В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что при быстропеременных полях диполи не успевают ориентироваться в направлении поля, и способность к поляризации уменьшается с увеличением частоты приложенного напряжения.

Дипольно-релаксационная поляризация свойственна полярным жидкостям; однако этот вид поляризации может наблюдаться также и в *твёрдых полярных органических веществах*. Но в этом случае поляризация обычно обусловлена уже поворотом не самой молекулы, а имеющихся в ней полярных радикалов по отношению к молекуле. Такую поляризацию называют также *дипольно-радикальной*. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильных групп –ОН и кислорода.

*Ионно-релаксационная* поляризация (*С*ир, *r*ир) наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов, например в неорганических стёклах, и связана с необратимой потерей энергии. В этом случае на фоне хаотических тепловых движений слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля получают избыточные перебросы в направлении поля и смещаются на расстояния, превышающие постоянную решётки. После снятия поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия.

*Электронно-релаксационная* поляризация (*С*эр, *r*эр) возникает за счёт возбуждения тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или дырок. Она характерна для диэлектриков, приближающихся по свойствам к полупроводникам. Для этого механизма следует отметить относительно высокую способность к поляризации, а также наличие максимума при определённой температуре.

*Миграционная* поляризация (*С*м, *r*м) является дополнительным механизмом поляризации, проявляющимся в твёрдых телах неоднородной структуры при наличии в них проводящих и полупроводящих вкраплений. Эта поляризация проявляется при наиболее низких частотах и связана со значительными потерями электрической энергии. Причинами возникновения такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоёв с различной проводимостью и т. д. При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, которое становится подобным огромной поляризованной молекуле. В граничных слоях слоистых материалов и в приэлектродных слоях может быть накопление зарядов медленно движущихся ионов, что создаёт эффект миграционной поляризации.

*Резонансная* поляризация (*С*рез, *r*рез) наблюдается в диэлектриках при световых частотах. Она зависит от физико-химических особенностей вещества, может относиться к собственной частоте электронов или ионов (при очень высоких частотах) или к характеристической частоте дефектных электронов (при более низких частотах).Резонансные потери наблюдаются в газах и твёрдых телах, если частота электрического поля совпадает с частотой собственных колебаний частиц. Они выражаются в интенсивном поглощении энергии электромагнитного поля и используются для накачки лазеров.

*Самопроизвольная (спонтанная)* поляризация (*С*сп, *r*сп) сущест-вует у группы твёрдых диэлектриков, обладающих такими же осо-бенностями поляризации, как и сегнетова соль (NaКС4Н4О6·4Н2О), а потому получивших название *сегнетоэлектриков.* У сегнетоэлектриков наблюдается доменная структура, а зависимость заряда от напряжения (кулонвольтная характеристика) имеет форму петли гистерезиса (подробнее см. разд. 2).

Резистор *r*и соответствует потерям на **ионизацию,** происходящую при коронных разрядах и также в газовых включениях внутри жидких и твёрдых диэлектриков.

## 4.3 Диэлектрическая проницаемость материала и угол потерь

*Эквивалентная схема*замещения диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, представлена на рисунке 4.1, *б* в виде соединённых параллельно конденсатора *С* и резистора *r.*

Способность различных материалов поляризоваться в электрическом поле складывается из различных механизмов и характеризуется значением *относительной диэлектрической проницаемости*

ε = *С* / *С*0,

где *С*  – ёмкость конденсатора, заполненного диэлектриком;

*С*0 – ёмкость конденсатора того же размера в вакууме.

Диэлектрическая проницаемость материала ε формируется за счёт различных механизмов поляризации и зависит от температуры и частоты, её изменение при нагреве характеризуется *температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости* ТКε, измеряемым в К–1 (в долях на градус Кельвина). Для газов, неполярных жидкостей и твёрдых диэлектриков характерен отрицательный ТКε, что объясняется их расширением при нагреве. Для полярных жидких и твёрдых изоляционных материалов характерен положительный ТКε, т. к. подвижность диполей при нагреве увеличивается, однако возможны и участки с отрицательным ТКε. Численные значения ТКε для большинства изоляционных материалов находятся в пределах от миллионных до тысячных долей на кельвин.

*Диэлектрическими потерями* называют энергию электрического поля, затрачиваемую на нагрев диэлектрика. При переменном напряжении потери энергии в диэлектрике намного больше, чем при постоянном, здесь основной причиной нагрева является периодическое изменение поляризации диэлектрика. Если напряжения и токи синусоидальны, то их можно представить в виде проекций на вертикальную ось векторов, вращающихся против часовой стрелки с угловой частотой ω (радиан в секунду, с–1)

ω = 2 π *f* ,

где *f –* частота колебания, Гц.

Рисунок 4.1, *в* является векторной диаграммой, а точки проекции концов векторов на вертикальную ось координат описывают осциллограммы на ленте, протягиваемой в горизонтальном направлении.

Протекание синусоидального тока через конденсатор сопровождается его периодической перезарядкой. В идеальном конденсаторе *C* напряжение отстаёт от тока на четверть периода, т. е. на 90° (электрических). На векторной диаграмме рисунка вектор емкостного тока, равного *U*ω*C*, повёрнут относительно напряжения *U* на 90° против часовой стрелки, т. е. в сторону опережения. В реальном диэлектрике угол φ сдвига фаз между током и напряжением немного меньше, т. к. присутствует ток утечки через сопротивление *r* изоляции, равный *U/R* и совпадающий по фазе с напряжением *U*.*Углом потерь* энергии в материале диэлектриканазывают угол δ, дополняющий угол сдвига фаз φ между напряжением и током до 90°. Для оценки качества изоляционного материала используют *тангенс угла диэлектрических потерь tgδ*.Значение тангенсаугла диэлектрических потерьtgδ показывает, какая часть от энергии, запасаемой в изоляционном материале в процессе поляризации, теряется, т. е. расходуется на его нагрев. Чем меньше угол δ и его тангенс, тем меньше энергии теряется за 1 цикл переполяризации, следовательно, такой материал можно применять при более высокой частоте.

Потери энергии конденсатора вызывают его нагрев и могут привести к тепловому разрушению. Если конденсатор используется в колебательном контуре, то потери препятствуют острой настройке на резонанс. Они проявляются через снижение добротности контура и ускоренное затухание колебаний. Потери в изоляции проводов линий связи уменьшают дальность передачи сигналов. Оценка диэлектрических потерь имеет важное значение не только для высокочастотных устройств, но и для материалов, используемых в установках высокого напряжения. Особенно она важна в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку мощность диэлектрических потерь пропорциональна квадрату действующего значения приложенного к диэлектрику напряжения. Мощность потерь в изоляции *P*, Вт,

*P* = ω*CU*2 tgδ,

где ω – угловая частота, с–1;

*C* – эквивалентная ёмкость изоляции, Ф;

*U* – действующее значение напряжения, В;

δ – угол диэлектрических потерь, tgδ = 1/(*r*ω*C*);

*r –* эквивалентное сопротивление изоляции, Ом.

Следует помнить, что параметры *С* и *r* схемы замещения определяются при определённых значениях частоты тока и температуры изоляции, и при других режимах будут иными.

Мощность потерь, отнесенную к единице объёма диэлектрика, называют удельными потерями и измеряют в ваттах на кубометр.

Характер проявления диэлектрических потерь различен в зависимости от агрегатного состояния электроизоляционных материалов: газообразного, жидкого, твёрдого.

*В газах* наблюдаются *ионизационные* потери при высоких напряжениях и, чаще всего, в неоднородном поле, когда напряжённость в отдельных местах превосходит некоторое критическое значение в газе. Ионизация воздуха в порах твёрдой органической изоляции сопровождается образованием озона и оксидов азота, что вызывает её химическое разрушение.

В чистых *неполярных жидкостях* диэлектрические потери обусловлены только **э***лектропроводностью* и пренебрежимо малы. У хорошо очищенного нефтяного трансформаторного масла tgδ = 0,001 при ε = 2,3.

В *полярных жидкостях* потери в основном поляризационные. Удельная электропроводность полярных жидкостей при комнатной температуре составляет 10–10–10–11 См/м, а дипольно-релаксационные потери, наблюдаемые при переменном напряжении, значительно превосходят потери от электропроводности, ввиду чего полярные жидкости используют только на промышленной частоте.

В *твёрдых* веществах, в зависимости от их состава и строения, возможны все виды диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери в особо чистых *неполярных* веществах с молекулярной структурой ничтожно малы. Полиэтилен, фторопласт, полистирол и другие полимеры широко применяют в качестве высокочастотной изоляции, в том числе и высоковольтной.

*Полярные* полимеры – поливинилхлорид, эпоксидные компаунды, кремнийорга­нические и фенолформальдегидные смолы, целлюлоза и другие из-за дипольно-релаксационной поляризации отличаются повышенными потерями и применяются в основном на промышленной частоте 50 Гц.

Диэлектрические потери в веществах с *ионной* структурой зависят от особенностей упаковки ионов в кристаллической решётке.

В веществах с плотной упаковкой ионов в отсутствие примесей, искажающих решётку, диэлектрические потери весьма малы. При повышенных температурах в этих веществах обнаруживаются потери на электропроводность. К веществам данного типа относятся слюда и другие кристаллические неорганические соединения, имеющие большое значение в производстве электротехнической керамики, например, корунд, входящий в состав ультрафарфора.

К диэлектрикам, имеющим кристаллическую структуру с неплотной упаковкой ионов, относится ряд кристаллических веществ, характеризующихся релаксационной поляризацией, вызывающей повышенные диэлектрические потери. Многие из них входят в состав изоляторного фарфора и огнеупорной керамики.

Диэлектрические потери в квазиаморфных веществах с ионной структурой (неорганических стёклах) в большой степени зависят от их состава (tgδ от 0,0002 до 0,01). При совпадении частоты напряжения с частотой колебаний ионов происходят резонансные потери.

Сегнетоэлектрики переполяризуются по петле гистерезиса, поэтому для них характерны весьма большие значения тангенса угла диэлектрических потерь, достигающие 0,1.

## 4.4 Показатели качества изоляции.

*Коэффициент абсорбции* ***DAR*** *(Dielectric Absorption Ratio)* — это коэффициент диэлектрического поглощения, отражающий степень увлажнённости диэлектрика изоляции. Коэффициент используется для принятия решения о необходимости просушки гигроскопической изоляции электрических машин и трансформаторов. Метод измерения основан на сравнении величин сопротивления изоляции, измеренных через 15 и 60 секунд после начала испытаний:

*DAR* = *R*60 **/** *R*15

Появление влаги в изоляции (абсорбция влаги) приводит к резкому снижению сопротивления *RISO* и росту тока утечки, так как во влаге содержатся растворенные примеси, т. е. свободные ионы. Уменьшение сопротивления опасно также и тем, что приводит к росту диэлектрических потерь. Вследствие этого снижается напряжение теплового пробоя и, кроме того, происходит дополнительный нагрев изоляции, что влечет за собой ускорение темпов теплового старения. Вода – это сильнополярный диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью во много раз больше, чем у диэлектрических материалов, используемых для изоляции. При неравномерном и сильном увлажнении это обстоятельство может привести к искажению электрического поля в изоляции и снижению пробивного напряжения. На практике, поглощённую влагу можно удалить из изоляции при сушке, но этот процесс потребует затрат времени и энергии.

В соответствии с действующими в РБ Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей (ТКП 181-2009) коэффициент абсорбции необходимо измерять на обмотках двигателей и обмотках трансформаторов после капитального и текущего ремонта. По нормативам коэффициент абсорбции должен составлять не меньше 1,3. Если изоляция сухая, то этот показатель обычно превышает 1,4. Коэффициент абсорбции влажной изоляции близок к 1, и такую изоляцию необходимо просушить.

*Индекс поляризации* ***PI*** *(Polarization Index)* показывает способность заряженных частиц перемещаться в диэлектрике под воздействием электрического поля, что определяет степень старения изоляции. Метод измерения основан на сравнении величин сопротивления изоляции через 60 и 600 секунд после начала испытаний:

*PI* = *R*600 **/** *R*60

Коэффициент поляризации не является обязательным при проведении испытаний и определяется при комплексном испытании электроустановок. Значение коэффициента показывает остаточный ресурс изоляции. Данное испытание занимает достаточно много времени и характеризует сильно замедленный поляризацией ток. Значение коэффициента абсорбции и индекса поляризации для разного качества изоляции представлено в таблице 4.1.

*Таблица 4.1* – **Значения индекса поляризации и коэффициента**

**абсорбции для разного качества изоляции**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Индекс поляризации | Коэффициент абсорбции | Качество изоляции |
| < 1 | < 1,25 | Опасное |
| 1...2 | Несоответствующее |
| 2...4 | 1,25…1,6 | Хорошее |
| > 4 | > 1,6 | Отличное |

*Коэффициент диэлектрического разряда DD (Dielektric Discharge)* используется при проверке неоднородной или многослойной изоляции, позволяя обнаружить дефектный слой среди исправных слоёв с высоким сопротивлением. При помощи стандартных измерений коэффициентов *PI*  и *DAR* такой дефект можно не заметить. Сначала исследуемая изоляция заряжается напряжением в течение определенного времени и измеряется её ёмкость. После завершения процесса зарядки и поляризации, единственным током, текущим через изоляцию будет ток утечки. Затем объект измерения разряжается и через изоляцию начинает течь суммарный ток диэлектрического разряда. Этот ток первоначально является суммой тока разряда ёмкости, который очень быстро исчезает, и тока абсорбции. Ток утечки будет незначительный, так как отсутствует испытательное напряжение. Поэтому коэффициент диэлектрического разряда является величиной, характеризующей качество изоляции, независимо от испытательного напряжения.

Через 1 минуту после короткого замыкания измерительной цепи, измеряется остаточный протекающий ток. Значение *DD* рассчитывается по следующей формуле:

*DD* = *I*1 МИН / (*U*ИЗМ ∙ *С*),

где  *I*1 МИН – ток, измеренный через 1 минуту после короткого замыкания, нА;

*U*ИЗМ  – напряжение при измерении, В;

*С* – ёмкость, мкФ.

Значения коэффициента диэлектрического разряда для разного качества изоляции представлено в таблице 4.2.

*Таблица 4.2* – **Коэффициент диэлектрического разряда**

**для разного качества изоляции**

|  |  |
| --- | --- |
| Коэффициент диэлектрического разряда | Качество изоляции |
| > 7 | Очень плохое |
| 4…7 | Плохое |
| 2…4 | Неудовлетворительное |
| < 2 | Хорошее |

## 4.5 Пробой изоляции и электрическая прочность диэлектрика

Находясь в электрическом поле, диэлектрик может потерять свойства изоляционного материала, если напряжённость поля превысит некоторое критическое значение. Явление образования проводящего канала под действием электрического поля называют *пробоем.* Если произошёл пробой газовой изоляции, то благодаря высокой подвижности молекул пробитый участок после снятия напряжения восстанавливается. Жидкий диэлектрик также может восстановить свои изоляционные свойства, но частично, так как загрязняется из-за распада части молекул. Пробой твёрдых диэлектриков приводит к необратимому разрушению изоляции.

Значение напряжения, приводящего к пробою изоляции, называют *пробивным напряжением* *U*пр. Значение пробивного напряжения зависит от толщины диэлектрика *h* и формы изоляционной детали, а также конфигурации электродов и параметров приложенного напряжения – полярности, частоты, амплитуды. Поэтому оно характеризует не столько свойства материала, сколько способность конкретного изоляционного изделия противостоять воздействию конкретного электрического поля. Характеристикой самих материалов, удобной для их сравнения, является электрическая прочность. *Электрической прочностью* называют напряжённость *Е*пр, соответствующую пробивному напряжению *U*пр в однородном электрическом поле. Однородным называют поле, в каждой точке которого напряжённость имеет одно и то же значение и направление. Однородное поле может быть получено между плоскими электродами с закруглёнными краями, а также между сферами, если расстояние между ними не превышает их диаметра. Электрическая прочность *Е*пр измеряется в вольтах, делённых на метр

*Е*пр = *U*пр/*h*,

где *U*пр – пробивное напряжение, В;

*h* – расстояние между электродами, м.

На практике используют единицу измерения кВ/мм = МВ/м.

В зависимости от механизма протекания, пробой диэлектриков может быть исключительно электрическим, электротепловым и электрохимическим. *При электрическом пробое* канал высокой проводимости возникает за счет резкого увеличения количества заряженных частиц – это могут быть свободные электроны примеси или электроны, вырываемые электрическим полем с поверхности металлических электродов. Электрический пробой наступает при подаче напряжения, превышающего предельно допустимое значение. Процесс электрического пробоя соответствует вертикальному участку кривой на рисунке 4.2.



*Электротепловой пробой* происходит за счет разогрева диэлектрика от приложенного напряжения, вследствие диэлектрических потерь. Причем с увеличением температуры электрическое сопротивление изоляции уменьшается, т.е. растет сквозной ток и это в свою очередь приводит к разогреву диэлектрика вплоть до изменения его механических свойств: он растрескивается, оплавляется и, таким образом, даже при относительном низком напряжении, может наступить электротепловой пробой изоляции.



Рисунок 4.2 - Зависимость *RISO* от

напряжения измерения

В твердых диэлектриках в канале пробоя остаются проводящие продукты разложения, поэтому электроизоляционные свойства после снятия напряженности не восстановятся.

Рисунок 4.3-Зависимость сопротивления *RISO* от температуры

Величина сопротивления изоляции зависит от температуры диэлектрика и с повышением температуры резко уменьшается по экспоненте (рисунок 4.3). Однако, чаще всего, причиной выхода изоляции из строя является *электрохимический пробой,* происходящий в результате её старения – постепенного необратимого ухудшения свойств из-за различных химических реакций, особенно вызванных воздействием высокого

напряжения.

## 4.6 Электрический пробой газа в однородном поле

Пробой газав однородном полепроисходит в результате развития стримера путём ударной и фотонной ионизации (рисунок 4.4.)

Рисунок 4.4 – Фотонно-ударный механизм развития стримера при лавинном пробое газа в однородном электрическом поле

Небольшое количество свободных электронов образуется в газе под действием солнечных и космических излучений либо радиоактивного излучения Земли. Содержащиеся в газе электроны находятся в беспорядочном тепловом движении. При воздействии напряжённости электрического поля электрон начинает двигаться с ускорением, приобретая дополнительную энергию. Дополнительная энергия электрона сообщается атомам или молекулам газа, с которыми он сталкивается. Если энергия достаточно велика, при столкновении электрона с атомом происходит его ионизация, т. е. расщепление на электрон и положительный ион. Значения энергии ионизации различных газов лежат в пределах от 4 до 25 эВ. В результате ударной ионизации число свободных электронов и ионов лавинообразно нарастает.

Если в процессе ускорения электрон не смог набрать энергию, достаточную для ионизации атома, он переводит атом в возбужденное состояние, изменяя структуру его электронной оболочки. В следующий момент этот «возбужденный» атом возвращается в спокойное состояние, отдавая свою избыточную энергию в форме излучения – испускает фотон. Заметим, что направление движения испускаемых фотонов не зависит от электрического поля, а скорость близка к скорости света. При поглощении фотона другим атомом возможна его ионизация. Внутренняя фотонная ионизация газа, благодаря большой скорости распространения излучения, приводит к особо быстрому развитию стримеров – каналов с повышенной проводимостью газа. Схема, представленная на рисунке 1.2, поясняет, почему рост электропроводящего канала (стримера) происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. Волнистыми линиями изображены пути фотонов. Фотоны обгоняют лавину и ионизируют частицы газа. Зарождается новая лавина. Нагоняя друг друга, отдельные лавины сливаются в сплошной канал ионизированного газа.

Экспериментально установлен *закон Пашена* **–** зависимость пробивного напряжения от *p* x *h* (произведения давления *p* на расстояние между электродами *h*). График этой зависимости изображён на рисунке 4.5, *а*.

Напряжение *U*пр, В

Произведение *p* x *h*, П·м

,→

0

Рисунок 4.5 – Закон Пашена (*а*) и зависимость

электрической прочности от давления (*б*)

Давление *p*, Па

0

*h* = *const*

Напряжённость *E*пр, В/м

*а*)

*б*)

На графике виден явно выраженный минимум и две восходящие ветви. Анализируя закон Пашена, следует отметить, что минимальное напряжение, при котором может произойти пробой воздуха, составляет около 300 В.

Разделим обе координаты на *h* и получим зависимостьэлектрической прочности *E*пр от давления *p* при неизменном расстоянии между электродами, изображённую на рисунке 4.5, *б*. При увеличении давления электрическая прочность газа возрастает в результате уменьшения расстояния между молекулами и, соответственно, длины свободного пробега электронов. При малых давлениях увеличение электрической прочности объясняется уменьшением вероятности столкновения электронов с молекулами газа на их пути к положительному электроду.

Из графиков следует два вывода:

1 При проектировании высоковольтного оборудования следует учитывать толщину возможных разрядных промежутков.

2 Для увеличения электрической прочности газовой изоляции следует либо откачивать газы до вакуума, либо сжимать их повышенным давлением.

При нормальном давлении 1 см воздуха пробивается при напряжении около 30 кВ, что можно использовать для проверки наличия высокого напряжения, например в телевизорах и мониторах с электронно-лучевыми трубками.

Электрическая прочность газа зависит от его химического состава. Особо высокая электрическая прочность у тяжёлых газов, содержащих фтор и хлор. Во внешней электронной оболочке галогенов не хватает всего одного электрона, и они легко захватывают свободный электрон, выключая его из процесса ионизации. Инертные газы обладают пониженной электрической прочностью, что используется при образовании плазмы в газоразрядных приборах. Ещё меньше электрическая прочность паров металлов, из которых наибольшее техническое применение нашли пары ртути и натрия.

## 4.7 Особенности пробоя газа в неоднородном поле

Пробой газа в неоднородном поле происходит при меньшем напряжении, чем в однородном. Для исследования этого процесса используют поле между остриём и плоскостью. Зависимость пробивного напряжения от расстояния при различной полярности электродов показана на рисунке 4.6. Вблизи острия напряжённость поля выше, чем на удалении, и если она достигает критических значений, на острие возникает *частичный разряд (ЧР)*, сопровождаемый свечением и негромким звуком. Свечение на концах мачт в грозу назвали «огнями святого Эльма», это же явление можно наблюдать на острых шпилях зданий и громоотводах.

Частичным разряд называют потому, что вдали от острия условия ударной ионизации не соблюдаются, и пробоя не происходит. Однако фотонная ионизация происходит во всём объеме разрядного промежутка, что приводит к значительному уменьшению пробивного напряжения, особенно при положительной полярности острия.

В результате ионизации вблизи острия образуются электроны и ионы. При положительной полярности острия электроны быстро нейтрализуются на нём, а малоподвижные положительно заряженные ионы создают объёмный заряд, который фактически является продолжением острия и сокращает эффективную длину разрядного промежутка. При отрицательной полярности острия объёмный положительный заряд играет роль экрана, сглаживающего неоднородности поля в разрядном промежутке.

Напряжение *U*пр, кВ

Расстояние *h*, мм

0

~

Рисунок 4.6 – Пробой газа

в неоднородном поле

При возрастании напряжения в неоднородном поле вначале возникает частичный разряд вблизи острия. По мере увеличения напряжения корона переходит в искровой разряд.

*О вреде частичных разрядов:*

1 Уменьшают напряжение пробоя изоляционного промежутка;

2 При ЧР образуются активные газы, разрушающие изоляцию.

Под действием этих газов, особенно озона, в присутствие воды в твёрдой изоляции развиваются *водяные дендриты (водные триинги),* прорастающие вглубь материала подобно корням деревьев, что со временем приводит к пробою изоляции.

3 Электрическая энергия ЧР переходит в тепловую и световую.

4 Частичные разряды являются источником радиопомех.

Искусство проектировщика высоковольтного оборудования – сгладить неоднородности поля, чтобы не было частичных разрядов.

*Поверхностный пробой* (перекрытие изоляции) можно наблюдать при испытании и эксплуатации твёрдых диэлектриков с высокой электрической прочностью. В случае поверхностного пробоя структура твёрдого диэлектрика не нарушается, однако пробивное напряжение вдоль поверхности твёрдого диэлектрика значительно меньше, чем в воздухе при той же длине разрядного промежутка, особенно при повышенной влажности и загрязнении этой поверхности.

Для предотвращения поверхностного пробоя необходимо по возможности увеличивать длину разрядного пути вдоль поверхности твёрдого диэлектрика. Этому способствует создание ребристой поверхности изоляторов, проточка разного рода канавок, изготовление конструкций с «утопленными» электродами. Повышение рабочих напряжений достигается также сглаживанием неоднородностей электрического поля за счёт изменения формы электродов или оптимизации конструкции изолятора, а также за счёт нанесения на поверхность изолятора полупроводящих покрытий или диэлектрических плёнок с повышенной диэлектрической проницаемостью.

## 4.8 Изоляционные газы и жидкости

Для высоковольтной изоляции наиболее широкое применение находит **элегаз** (электрический газ, гексафторид серы SF6). Он инертен по отношению к меди и алюминию, химически стоек до 800 °C. Электрическая прочность элегаза в 2,5 раза больше, чем у воздуха, что позволяет значительно уменьшить объём и массу газонаполненного электрооборудования, по сравнению с воздушным.

Элегаз применяется в герметизированных распределительных устройствах, конденсаторах, трансформаторах, выключателях и высоковольтных кабелях. Газонаполненные (элегазовые) кабели просты по своей конструкции, имеют малые емкостные (зарядные) токи. Трансформаторы с элегазовым заполнением взрывобезопасны. В высоковольтных выключателях элегаз применяется благодаря его высоким дугогасящим свойствам.

Основные недостатки: опасны разряды в элегазе в присутствии органической изоляции, так как образуются химически очень активные и ядовитые вещества; сравнительно высокая стоимость. В целях удешевления газовой изоляции часто применяют элегаз в смеси с более дешёвым азотом.

Перспективны *перфторированные углеводороды*, в молекулах которых все атомы водорода заменены фтором. От CF4 до C4F10 в нормальных условиях являются газами с электрической прочностью большей, чем у воздуха в 6–10 раз, а также *фреон* CCl2F2 – в 2,5 раза.

*Жидкие* диэлектрики, благодаря большей плотности, отличаются более высокими значениями электрической прочности, чем газы.

Пробой технически чистых жидкостей объясняют частичным перегревом жидкости и вскипанием её в местах наибольшего количества примесей, что приводит к образованию газового мостика, по которому и происходит пробой.

Наибольшее распространение получило *трансформаторное масло* – жидкость от почти бесцветного до тёмно-жёлтого цвета, представляющая собой смесь различных углеводородов. Получается из нефти посредством её ступенчатой перегонки с последующей тщательной очисткой от химических примесей. Основные области применения трансформаторного масла – силовые маслонаполненные трансформаторы и высоковольтные масляные выключатели.

Заполняя поры волокнистой изоляции, масло существенно повышает её электрическую прочность, улучшает отвод тепла от обмоток и сердечников, а в масляных выключателях способствует гашению электрической дуги, возникающей между расходящимися контактами.

При работе в электрических устройствах масло постепенно ухудшает свои характеристики (стареет), становится более тёмным. В нём образуются загрязняющие продукты – кислоты, смолы как растворимые в масле, так и не растворимые – “ил”, который осажда­ется на дно бака и на погружённые в масло детали, значительно ухудшая отвод тепла. Кроме того, образующиеся кислоты разрушают изоляцию обмоток и вызывают коррозию металлов.

Скорость старения масла возрастает при доступе воздуха (окисление кислородом, озоном), повышении температуры, соприкосновении масла с некоторыми металлами (медь, железо, свинец и т. д.), воздействии света и электрического поля высокой напряжённости, а особенно под воздействием дуги.

Регенерация масла, т. е. удаление из масла продуктов старения, осуществляется обработкой его адсорбентами (особые типы глин или искусственные материалы), поглощающими влагу и примеси полярного характера. Для замедления старения масла применяются воздухоочистительные фильтры, ингибиторы (антиокислительные присадки), используется азотная защита и т. д. Для удаления влаги производят термическую сушку трансформаторного масла.

По своим электрическим характеристикам хорошо очищенное от примесей и влаги трансформаторное масло имеет свойства неполярного диэлектрика: ε = 2,2–2,3; tg δ ≤ 0,003; ρ = 1012–1013 Ом⋅м (характеристики приведены для *t* = 20 °C и *f* = 50 Гц).

Практически важные свойства трансформаторного масла нормируются стандартом ГОСТ 982 – 80. К ним относятся: кинематическая вязкость, температура вспышки паров, температура застывания и кислотное число. Электрическая прочность трансформаторного масла стандартом не нормируется, но предусматривается правилами технической эксплуатации электростанций (ПТЭ).

Недостатком трансформаторного масла является его горючесть.

*Конденсаторное масло* служит для пропитки бумажных конденсаторов и отличается особо тщательной очисткой адсорбентами.

*Кабельные масла* используются для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей. Для увеличения вязкости в них добавляют канифоль или синтетический загуститель.

*Полиизобутилен* низкой степени полимеризации отличается от нефтяных масел лучшими диэлектрическими свойствами, используется в бумажных конденсаторах и для пропитки бумажной изоляции кабелей (нестекающая изоляция).

*Совол* (С12Н5Cl5) представитель хлорированных углеводородов. Полярный диэлектрик с ε = 4,5–5, применяется для пропитки изоляции бумажных конденсаторов. Совол не горюч, химически нейтрален ко всем видам изоляции и не окисляется на воздухе даже при небольшом нагреве. Однако из-за возможности образования токсичных соединений при высокой температуре хлорированные углеводороды в технически передовых странах выводят из употребления.

*Кремнийорганические жидкости* нетоксичны, не гигроскопичны, нагревостойки. Применяются для пропитки конденсаторов, заливки маломощных трансформаторов и других устройств. Основу любого кремнийорганического диэлектрика составляет силоксановая цепь атомов – Si – O – Si – O –Si –. Кремнийорганические жидкости по своим электрическим характеристикам приближаются к неполярным диэлектрикам ε = 2,4–2,5; tgδ = (2–3)⋅10–4; ρ = 1011–1012 Ом⋅м; Uпр ≥ 45 кВ (в стандартном разряднике при расстоянии между электродами 2,5 мм). Температура вспышки паров кремнийорганических жидкостей нормируется не ниже 300 °С, при более высоких температурах эти жидкости самовоспламеняются. Как и другие кремнийорганические диэлектрики, эти жидкости весьма дорогие.

*Фторорганические жидкости* имеют высокие электрические характеристики, ничтожно малую гигроскопичность и высокую нагревостойкость (200 °С и выше), очень высокую химическую стойкость, негорючи, дугостойки, взрывобезопасны. Обеспечивают интенсивный отвод тепла от обмоток и магнитопроводов, особенно в режиме «кипящей изоляции». Очень дорогие.

## 4.9 Особенности пробоя твёрдой изоляции

У *твёрдых* диэлектриков могут наблюдаться три основных механизма пробоя: 1) электрический; 2) электротепловой; 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.

*Электрический пробой* по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твёрдом теле создается электронная лавина. Развитие лавин сопровождается фотоионизацией (как в газах), которая ускоряет образование проводящего канала. Ускоренные полем электроны при столкновениях передают свою энергию узлам решётки и разогревают её вплоть до плавления. В разрядном канале создается значительное давление, которое может привести к появлению трещин или полному разрушению изолятора. Электрический пробой имеет место там, где исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, нагревающих материал, а также отсутствует ионизация газовых включений. При этом электрическая прочность *Е*пр может превышать 1000 МВ/м. Электрический пробой наблюдается у большинства диэлектриков при кратком (импульсном) воздействии напряжения.

*Электротепловой пробой* возникает в том случае, когда количество тепловой энергии, выделяющейся в диэлектрике за счёт диэлектрических потерь, превышает то количество энергии, которое может рассеиваться в данных условиях; при этом нарушается тепловое равновесие и процесс приобретает необратимый характер. Явление электротеплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих расплавлению, обугливанию и пр. Электрическая прочность при электротепловом пробое является характеристикой не только материала, но и изделия из него.

Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, свя­зано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды и др. Кроме того, «электротепловое» пробивное напряжение зависит от нагревостойкости материала; органические диэлектрики (например, полистирол) имеют более низкие значения электротепловых пробивных напряжений, чем неорганические (кварц, керамика) при прочих равных условиях вследствие их малой нагревостойкости. Типичными признаками электротеплового пробоя являются уменьшение пробивного напряжения по экспоненте с ростом температуры, а также временная задержка пробоя.

Разновидностью электротеплового пробоя можно считать *ионизационный* пробой. Он характерен для твёрдых пористых диэлектриков, обусловлен ионизацией газа в порах и особенно опасен в хрупких материалах, поскольку термомеханические напряжения могут превзойти предел прочности материала и вызвать его растрескивание.

Тонкие плёнки обладают существенно более высокой электрической прочностью, чем массивные образцы благодаря упорядоченной структуре и лучшему охлаждению.

*Электрохимический пробой* электротехнических материалов наблюдается при повышенных температурах и высокой влажности.

При постоянном и переменном напряжении низкой частоты в материале развиваются процессы, приводящие к необратимому уменьшению сопротивления изоляции (электрохимическое старение). Кроме того, электрохимический пробой можно наблюдать при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся нагревом и восстановлением, например в керамике, оксидов металлов переменной валентности. Электрохимический пробой развивается во многих органических диэлектриках, особенно под действием частичных разрядов (см. выше). Частичные разряды (ЧР) происходят в местах наибольшей напряжённости электрического поля, там, где наблюдается его неоднородность. Разрушение изоляции происходит в виде специфических дефектов, которые раньше называли водяными дендритами (гр. *dendron* – дерево), а теперь используют термин водные триинги (англ. *tree* – дерево). Дендрит прорастает в изоляционный слой подобно корням дерева, при этом постепенно увеличивается мощность разряда, а эффективная толщина изоляции уменьшается, что, в конце концов, приводит к пробою. Процессы прорастания дендритов длятся годами и десятилетиями, современный уровень развития техники позволяет их контролировать, прогнозируя момент выхода электрооборудования из строя и оценивая остаточный ресурс службы.