

Тема 3.1 «Физика диэлектриков»

Диэлектриком называется вещество, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле.

Для диэлектрика характерно:

1) отсутствие (или незначительное количество) свободных электрических зарядов, способных участвовать в электропроводности. Поэтому для диэлектрика характерно большое сопротивление прохождению постоянного тока.

2) наличие сильно связанных зарядов.

Степень поляризации диэлектрика характеризуется параметром P — поляризованностью, которая численно равна электрическому моменту единицы объема поляризованного диэлектрика.

Электрическая поляризация — это состояние вещества, при котором электрический момент некоторого объема вещества отличен от нуля.

Диэлектрики, в которых поляризация возникает только под действием электрического поля, называются линейными или пассивными и применяются в технике в качестве электроизоляционных материалов и в конденсаторах.

Электроизоляционные материалы — диэлектрические материалы, предназначенные для создания электрической изоляции токоведущих частей электрических машин и устройств.

Диэлектрики, которые поляризуются благодаря механическому воздействию, называются пьезоэлектриками, а явление — пьезоэлектрическим эффектом.

Диэлектрики, в которых возникает самопроизвольная поляризация в определенном интервале температур, называются сегнетоэлектриками, а явление — спонтанной поляризацией.

Пьезоэлектрики и сегнетоэлектрики являются нелинейными диэлектриками и относятся к классу активных диэлектриков. К этому же классу относятся диэлектрики с особыми оптическими свойствами, способные сохранять поляризованное состояние и создающие тем самым электрическое поле в окружающем пространстве после снятия внешнего поля.

Для количественной оценки степени поляризации диэлектрика пользуются характеристикой, называемой диэлектрической проницаемостью ϵ . Различают:

1) абсолютную диэлектрическую проницаемость ϵ^* — это величина, характеризующая способность диэлектрика образовывать электрическую емкость; ее размерность — $[Ф/м]$;

2) относительную, или просто диэлектрическую проницаемость ϵ .

Связь между абсолютной и относительной диэлектрическими проницаемостями определяется соотношением

$$\epsilon^* = \epsilon \cdot \epsilon_0, \quad (1)$$

где ε_0 — электрическая постоянная, характеризующая электрическое поле при отсутствии его взаимодействия с веществом, т.е. она характеризуют электрическое поле в вакууме: $\varepsilon_0 = 8,85[\text{пФ/м}]$.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε является безразмерной величиной.

Диэлектрическую проницаемость можно рассчитать по экспериментально измеренной емкости, используя для расчета выражение для емкости плоского конденсатора, зная его геометрические размеры

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2)$$

где S - площадь обкладки конденсатора;
 d - расстояние между обкладками.

Пробой диэлектриков

Явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля называют **пробоем**.

Следствием пробоя является возникновение тока короткого замыкания $I_{кз}$, который не зависит от природы диэлектрика и определяется лишь мощностью источника напряжения и сопротивлением внешней цепи. Ток короткого замыкания приводит к механическому и тепловому разрушению твердого диэлектрика — образуется сквозное проплавленное отверстие. Изделие с «пробитой» изоляцией не подлежит эксплуатации, так как при подаче напряжения произойдет повторно пробой изоляции, но уже при более низком напряжении. При пробое газообразного или жидкого диэлектрика в результате подвижности молекул после снятия напряжения «пробитый» участок восстанавливает свои первоначальные свойства и такой диэлектрик можно использовать вновь. При пробое газообразных диэлектриков принимают максимальные (амплитудные) значения напряжения и тока ($U_m = \sqrt{2}U_{эф}$, $I_m = \sqrt{2}I_{эф}$), так как пробой газов обусловлен чисто электрическими процессами — электронной ударной ионизацией, фотоионизацией и холодной эмиссией электронов из катода.

При пробое твердых и жидких диэлектриков принимают действующие (эффективные) значения напряжения $U_{эф}$ и тока $I_{эф}$, так как пробой этих диэлектриков обусловлен не только электронными процессами, но и тепловыми, возникающими в результате диэлектрических потерь.

Напряжение, при котором наступает пробой, называют пробивным напряжением $U_{пр}$, а напряженность электрического поля в данном случае характеризует электрическую прочность $E_{пр}$ диэлектрика.

Следовательно, **электрическая прочность $E_{пр}$ диэлектрика** — это минимальное значение напряженности приложенного электрического

поля, при котором наступает пробой. В простейшем случае можно принять $E_{пр}$, МВ/м

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (3)$$

где $U_{пр}$ - величина приложенного к диэлектрику напряжения, при котором произошел пробой, кВ;

h – толщина материала в месте пробоя, мм.

Электрическая прочность в однородных и неоднородных электрических полях

Электрическая прочность $E_{пр}$ диэлектриков зависит в первую очередь от степени однородности образца (у твердых диэлектриков — от количества и размера пор, у жидких — от частиц нерастворенной примеси, у воздуха — от микрокапель влаги), химического состава и строения материала, толщины образца (расстояния между электродами), частоты и времени приложения напряжения, давления, влажности и т.д. На сегодняшний день нет теории, которая учитывала бы одновременное влияние всех указанных факторов на механизм пробоя и с помощью которой можно было бы определить $E_{пр}$ любого диэлектрика.

Поэтому для всех диэлектриков $E_{пр}$ определяют экспериментально. Наиболее хорошо изученным является механизм пробоя воздуха.

Электрическая прочность газов зависит от степени неоднородности электрического поля, в котором происходит пробой. Чем выше неоднородность поля, тем ниже $E_{пр}$.

Пробой газов в однородном электрическом поле

Образование электрически заряженных частиц в газообразных диэлектриках вызывается ионизацией газа внешними источниками энергии (внешними ионизаторами: космическими и солнечными лучами, радиоактивными излучениями Земли).

Находясь в беспорядочном тепловом движении, некоторая часть отрицательно и положительно заряженных частиц воссоединяются, друг с другом образуя электрически нейтральные атомы и молекулы газа. Этот процесс называется восстановлением и рекомбинацией.

Если между металлическими электродами заключить какой-то объем газа, и приложить к электродам электрическое напряжение, то на заряженные частицы в газе будут действовать электрические силы, вызывающие напряженность электрического поля. Под действием этих сил электроны и ионы будут перемещаться от одного электрода к другому, создавая электрический ток в газе. Изменение величины тока в зависимости от напряжения, приложенного к объему газа, выражается графически в виде кривой называемой вольт-амперной характеристикой (ВАХ, рисунок 1).

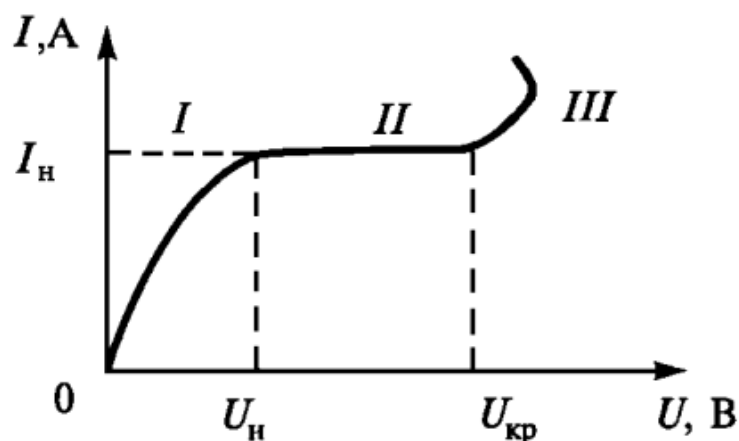


Рисунок 1 - Вольт-амперная характеристика

В области слабых электрических полей (область I), ток в газе возрастает пропорционально величине приложенного напряжения. В этой области изменение тока происходит согласно закону Ома, т. к. наряду с ионизацией заряженных частиц происходит и их рекомбинация.

В области II ток проводимости не зависит от напряжения, так как все ионы и электроны в газовом промежутке разряжаются на электродах, не успев рекомбинировать, здесь происходит накопление энергии заряженными частицами газа. Максимальный ток, не зависящий от приложенного напряжения, называется током насыщения I_n .

При критическом напряжении $U_{кр}$ энергии заряженных частиц достаточно для совершения ударной ионизации, которая выражается в резком возрастании скорости заряженных частиц, вследствие чего происходят частые соударения их с нейтральными частицами газа. В результате электроны отделяются от своих атомов, при этом образуются новые электрически заряженные частицы: свободные электроны и ионы. Их образование происходит весьма интенсивно. В области ударной ионизации (область III) ток в газе интенсивно возрастает, при малейшем повышении напряжения процесс ударной ионизации сопровождается резким уменьшением величины удельного объемного сопротивления. Развитие процесса ударной ионизации в газе приводит к пробое данного объема газа. В момент пробоя газа ток в нем резко возрастает, а напряжение снижается к нулю.

Однородное поле образуется между электродами одинаковой геометрической формы с большой площадью поверхности (например, плоскость-плоскость, шар-шар), когда их диаметр в 10 раз больше расстояния между ними.

Ударная ионизация электронами составляет основу пробоя газа. Однако электронная лавина еще не достаточна для образования пробоя, так как не создает проводящего пути между электродами.

Кроме явления ударной ионизации, создающей первую лавину заряженных частиц, при пробое газа большую роль играют фотоны. Параллельно с явлением ударной ионизации газа происходит переход

электронов на более высокие энергетические уровни. Эти электроны не теряют связь с ядром и, не задерживаясь на возбужденных уровнях, возвращаются на нормальные, излучая энергию в виде световых частиц фотонов. Таких молекул значительно больше, чем ионизированных. Они создают новые очаги ионизации и образуют фотоэлектронные лавины, что значительно ускоряет процесс пробоя газа.

В результате дальнейшего развития ударной ионизации возникает электронная лавина, которая, двигаясь к положительному электроду, встречает лавинный поток положительных ионов, направленных к отрицательному электроду. В результате в образовавшейся в газовом промежутке проводящей газоразрядной плазме, в которой плотности положительных ионов и электронов равны, возникает пробой газа, который происходит в виде искрового разряда, то есть светящихся искр, соединяющих поверхности металлических электродов, помещенных в газовой среде.

Пробой газа происходит мгновенно, при расстоянии между электродами $h = 1$ см, время пробоя примерно 10^{-8} с.

Пробой газов в неоднородном электрическом поле.

Неоднородное поле образуется между электродами, если хотя бы один из них имеет малую площадь. В основном неоднородные электрические поля существуют в газоразрядных приборах, между контактами реле, между провода- 86 ми линий электропередачи.

Пробой газа в неоднородном поле, как правило, происходит при меньшем пробивном напряжении по сравнению с пробоем того же слоя газа в однородном электрическом поле.

Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде «короны», который сопровождается свечением и разрушением молекул. При дальнейшем повышении напряжения корона перерастает в кистевой разряд, который затем превращается в искровой. При большой мощности неоднородного электрического поля образуется дуговой разряд, который сопровождается образованием озона (соединение из трех атомов кислорода, образуется при разряде электричества; газ с характерным запахом) и оксидов азота и характерным шипением, потрескиванием и своеобразным свечением.

Часто возникает пробой на границе раздела с твердым диэлектриком. Такой пробой в технике называют поверхностным. На поверхностное пробивное напряжение в области низких частот сильное влияние оказывает влажность воздуха, степень запыления изолятора и химический состав пыли.

Поверхностное пробивное напряжение можно повысить, увеличивая путь поверхностного разряда. С этой целью поверхность изолятора часто делают ребристой.

Виды пробоев

Если проводящий канал проходит от одного электрода к другому и замыкает их, происходит *полный* пробой. Если проводящий канал не достигает

хотя бы одного из электродов, происходит *неполный* пробой. При частичном пробое пробивается лишь газовое или жидкое включение твердого диэлектрика. У твердых диэлектриков кроме пробоя по объему возможен пробой по поверхности, такой пробой называют *поверхностным*.

Электрический пробой – начинается с процесса ударной ионизации, возникающей при больших напряжениях, приложенных к диэлектрику. В результате частых соударений свободных электронов с молекулами и атомами диэлектрика освобождаются новые электроны. Они создают электронную лавину, пронизывающую твердый диэлектрик по всей его толщине. При этом диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства. Этот вид пробоя протекает почти мгновенно, в течение $10^{-8} \dots 10^{-5}$ с.

Тепловой пробой – это явление теплового разрушения диэлектрика по каналу, соединяющему два противоположных электрода диэлектрика. В результате в канале будет проходить ток проводимости. Этот ток вызывает выделение тепла и нагрев этого канала, что приведет к возрастанию тока сквозной проводимости и сплошному прожиганию или расплавлению твердого диэлектрика. Тепловой пробой возникает, когда нарушается равновесие между теплотой, выделяющейся в диэлектрике, и теплотой, которая отводится в окружающую среду. Тепловой пробой развивается в течение $10^{-3} \dots 10^2$ с, т.е. во много (миллионы) раз медленнее электрического пробоя.

Электрохимический пробой (электрическое старение) обусловлен медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, которые развиваются под действием электрического поля или частичных разрядов в диэлектрике или в окружающей диэлектрик среде. Время развития электрохимического пробоя (его называют еще временем жизни $\tau_{ж}$ диэлектрика) может достигать $10^3 \dots 10^8$ с. С увеличением напряженности электрического поля в диэлектрике или температуры диэлектрика, как правило, $\tau_{ж}$ уменьшается. Процесс электрохимического пробоя развивается в электрических полях с напряженностью, значительно меньшей, чем электрическая прочность диэлектрика.

Следствием пробоя является возникновение тока короткого замыкания $I_{кз}$, который не зависит от природы диэлектрика и определяется лишь мощностью источника напряжения и сопротивлением внешней цепи. Ток короткого замыкания приводит к механическому и тепловому разрушению твердого диэлектрика — образуется **сквозное проплавленное отверстие**. Изделие с «пробитой» изоляцией не подлежит эксплуатации, так как при подаче напряжения произойдет повторно пробой изоляции, но уже при более низком напряжении. При **пробое газообразного** или **жидкого** диэлектрика в результате подвижности молекул после снятия напряжения **«пробитый» участок восстанавливает** свои первоначальные свойства и такой диэлектрик можно использовать вновь. При пробое газообразных диэлектриков принимают максимальные (амплитудные) значения напряжения и тока ($U_m = \sqrt{2}U_{эф}$, $I_m = \sqrt{2}I_{эф}$), так как **пробой газов обусловлен** чисто

электрическими процессами — электронной ударной ионизацией, фотоионизацией и холодной эмиссией электронов из катода.

При пробое твердых и жидких диэлектриков принимают действующие (эффективные) значения напряжения $U_{эф}$ и тока $I_{эф}$, так как пробой этих диэлектриков обусловлен не только электронными процессами, но и тепловыми, возникающими в результате диэлектрических потерь.

Напряжение, при котором наступает пробой, называют пробивным напряжением $U_{пр}$, а напряженность электрического поля в данном случае характеризует электрическую прочность $E_{пр}$ диэлектрика.

Следовательно, электрическая прочность $E_{пр}$ диэлектрика — это минимальное значение напряженности приложенного электрического поля, при котором наступает пробой. В простейшем случае можно принять

$$E_{пр} = U_{пр} / h, \quad (5-1)$$

где h — толщина диэлектрика в месте пробоя.

Электрическая прочность $E_{пр}$ диэлектриков зависит в первую очередь от степени однородности образца (у твердых диэлектриков — от количества и размера пор, у жидких — от частиц нерастворенной примеси, у воздуха — от микрокапель влаги), химического состава и строения материала, толщины образца (расстояния между электродами), частоты и времени приложения напряжения, давления, влажности и т.д. **На сегодняшний день нет теории, которая учитывала бы одновременное влияние всех указанных факторов на механизм пробоя и с помощью которой можно было бы определить $E_{пр}$ любого диэлектрика.** Поэтому для всех диэлектриков $E_{пр}$ определяют экспериментально. Наиболее хорошо изученным является механизм пробоя воздуха.

Проводимость диэлектриков

Электропроводностью (проводимостью) называется способность вещества проводить электрический ток под действием постоянного электрического поля.

Носителями зарядов могут быть электроны (дырки), ионы и молекулы — заряженные группы молекул (коллоидные частицы). В связи с этим электропроводность бывает:

1) Электронная — характерна для проводников (металлов), полупроводников и относительно реже встречается у диэлектриков;

2) Ионная — наблюдается у кристаллических диэлектриков за счет ионов самого вещества или ионов примесей. Однако она особенно характерна для аморфных веществ — смол, лаковых пленок, компаундов, стекол, а также для жидких диэлектриков, прохождение ионных токов в которых сопровождается явлением электролиза, т.е. переносом вещества с образованием вблизи электродов новых химических веществ. Это явление используется при нанесении различных покрытий;

3) Молионная - по своей физической сущности довольно близка к ионной и наблюдается в коллоидных системах, представляющих собой смесь двух веществ (фаз), одно из которых в виде макроскопических частиц находится во взвешенном состоянии в другом веществе. Из коллоидных систем наиболее часто используются в электроизоляционной технике эмульсии (обе фазы — жидкости) и суспензии (одна фаза — твердое вещество, другая — жидкость). При наложении внешнего поля молионы приходят в движение, и процесс сопровождается явлением электрофореза, который отличается от электролиза тем, что не происходит образование новых веществ, а лишь меняется концентрация одной фазы в другой за счет осаждения молионов на электродах. Примером практического использования электрофореза является покрытие металлических предметов каучуком и смолами из их суспензий. Молионная электропроводность наблюдается у жидких лаков и компаундов, увлажненных масел и т.д.

Электропроводность диэлектриков в большинстве случаев носит ионный характер, т.е. носителями зарядов являются ионы, так как они часто оказываются слабо закрепленными в узлах решетки. На электропроводность твердых диэлектриков большое влияние оказывают различные примеси, которые обычно легче диссоциируют с образованием свободных ионов, чем основной диэлектрик. Объемная электропроводность при низких температурах обусловлена передвижением слабо закрепленных ионов, в частности ионов примеси.

При повышенных температурах электропроводность обусловлена переносом ионов основного вещества диэлектрика, освобожденных из узлов кристаллической решетки.

У диэлектриков различают два вида электропроводности: объемную, которая определяется током объемной утечки I_v , и поверхностную, обусловленную током поверхностной утечки I_s .

В связи с этим в диэлектриках различают два вида удельных сопротивлений:

1) удельное объемное сопротивление ρ_v количественно определяет способность диэлектрика пропускать электрический ток I_v через объем диэлектрика.

2) удельное поверхностное сопротивление ρ_s определяет способность пропускать электрический ток I_s по поверхности диэлектрика.

Электропроводность диэлектриков зависит от содержания примесей. Чем выше содержание примесей, тем меньше удельное объемное сопротивление изоляционного материала.

Удельное объемное и поверхностное электрические сопротивления твердых диэлектриков зависят от температуры, влажности и величины приложенного напряжения.

Потери в диэлектриках

Диэлектрические потери связаны со сложными явлениями, которые происходят в материале при воздействии на него электрического поля. Они

проявляются на постоянном и переменном токе. Однако качество диэлектрика на постоянном токе обычно характеризуется не диэлектрическими потерями, а удельным объемным и поверхностным сопротивлениями.

При воздействии электрического поля на любое вещество часть потребляемой им электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается. Рассеянную часть поглощенной диэлектриком электрической энергии называют **диэлектрическими потерями**.

Причины необратимых потерь:

- нагрев за счет протекания тока сквозной проводимости;
- потери энергии за счет замедленных видов поляризации.

При включении диэлектрика в цепь постоянного напряжения происходит резкий скачок тока, а затем уменьшение его до постоянного значения, называемого током сквозной проводимости $I_{ск}$ (или током утечки). Он вызван перемещением свободных зарядов в диэлектрике в процессе электропроводности и не изменяется со временем (если не происходит электроочистка диэлектрика или его старение).

$I_{ск}$ вызывает диэлектрические потери. Спадающий во времени ток, обусловленный перераспределением свободных зарядов, называют абсорбционным $I_{аб}$. Он обусловлен смещением связанных зарядов в ходе медленных поляризаций и вызывает рассеяние энергии в диэлектрике.

Ток, сопутствующий электронной и ионной поляризации, называют током смещения (емкостным током); его мгновенное значение обозначают $I_{см}$. Он спадает в течение $10^{-16} \dots 10^{-15}$ с, поэтому не вызывает рассеяние энергии в диэлектрике.

Таким образом, ток, проходящий через диэлектрик, представляет собой сумму токов смещения $I_{см}$, абсорбции $I_{аб}$ и сквозного $I_{ск}$: $I = I_{см} + I_{аб} + I_{ск}$.

Его δ , дополняющий до 90° угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи, называют углом диэлектрических потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь является важным параметром, характеризующим качество диэлектрика при работе на переменном напряжении. Введение безразмерного параметра $\operatorname{tg} \delta$ удобно потому, что не зависит от формы и размеров участка изоляции, а определяется лишь свойствами диэлектрического материала.

Чем больше тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, тем выше нагрев диэлектрика в электрическом поле заданной частоты и напряжения, тем больше потери в диэлектрике, тем хуже диэлектрик. Для хороших диэлектриков $\operatorname{tg} \delta \leq 10^{-4}$.