

№5. Электрическая прочность диэлектриков

- Содержание лекции:
- - определение пробоя диэлектриков и электрической прочности;
- - методы определений.
- Цели лекции: изучить явления пробоя диэлектриков.
- **5.1 Пробой диэлектриков**
- Каждый диэлектрик в электрическом поле теряет изоляционные свойства, если напряженность поля E превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название пробоя диэлектрика. Напряжение, при котором происходит пробой, называется пробивным напряжением $U_{пр}$, а $E_{пр}$ - пробивной напряженностью. Пробивная напряженность поля $E_{пр}$, определяется отношением пробивного $U_{пр}$ к толщине диэлектрика в месте пробоя

- $$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / \delta,$$
-

- где δ - толщина диэлектрика, м.
- В системе СИ $E_{\text{пр}}$ измеряется в В/м; но для практических расчетов удобной единицей измерения является кВ/мм: $1 \text{ В/м} = 10^{-6} \text{ кВ/мм}$.
- Разряд в воздухе у поверхности твердого диэлектрика называется поверхностным пробоем или поверхностным перекрытием. На величину поверхностного разряда оказывают влияние форма электрического поля, обусловленная конфигурацией электродов и диэлектрика, частота переменного тока, состояние поверхности диэлектрика, давление воздуха.
- При пробое в газах или жидких диэлектриках, в силу подвижности молекул, пробитый участок после снятия напряжения U восстанавливает свои первоначальные свойства.
- При пробое твердого диэлектрика в нем остается след в виде пробитого, прожженного или оплавленного отверстия неправильной формы. Повреждение поверхности твердого диэлектрика, связанное с образованием проводящих следов, называют трекингом.

- Номинальное напряжение U_n электрической изоляции должно быть меньше пробивного напряжения $U_{пр}$

$$U_{пр}/U_n = K_{пр}$$

- Это отношение называют коэффициентом запаса электрической прочности.
- Продолжительное воздействие электрического поля высокой напряженности E приводит к необратимым процессам в диэлектрике, в результате которых его $U_{пр}$ снижается, т.е. происходит электрическое старение изоляции. Вследствие такого старения срок службы изоляции ограничен. Кривую зависимости $U_{пр}$ от времени приложения напряжения U называют кривой жизни электрической изоляции.
- Электрическая прочность диэлектриков зависит от агрегатного состояния, от химического состава, структуры вещества и воздействия внешних факторов (температуры, атмосферного давления, толщины, частоты и однородности поля, времени приложения напряжения, влажности и др).
- Механизм пробоя газообразных, жидких и твердых диэлектриков имеют существенные различия.

Пробой газов.

-
-
- Число электронов, образующихся в 1 сек. В 1 см^3 воздуха под действием радиоактивности Земли или космических лучей, составляет от 10 до 20. Эти электроны являются начальными зарядами, приводящими к пробоем газа в достаточно сильном поле.
- При увеличении E электроны между двумя соударениями приобретают энергию $W=e\lambda E$ (3.60) достаточную для ионизации молекул газа $W>W_{и}$, где $W_{и}$ – энергия ионизации, e – заряд электрона, λ – длина свободного пробега. При столкновении с атомами и молекулами они порождают новые электроны. При этом «вторичные» электроны под действием поля, в свою очередь, вызывают ионизацию молекул газа. В результате, число электронов в газовом промежутке увеличивается лавинообразно. Интенсивность этого процесса определяется **коэффициентом ударной ионизации α** , равным числу ионизации электронов на единицу длины пути. Эти электроны распределяются в межэлектродном пространстве, образуя **электронную лавину**.
-

Пробой жидких диэлектриков

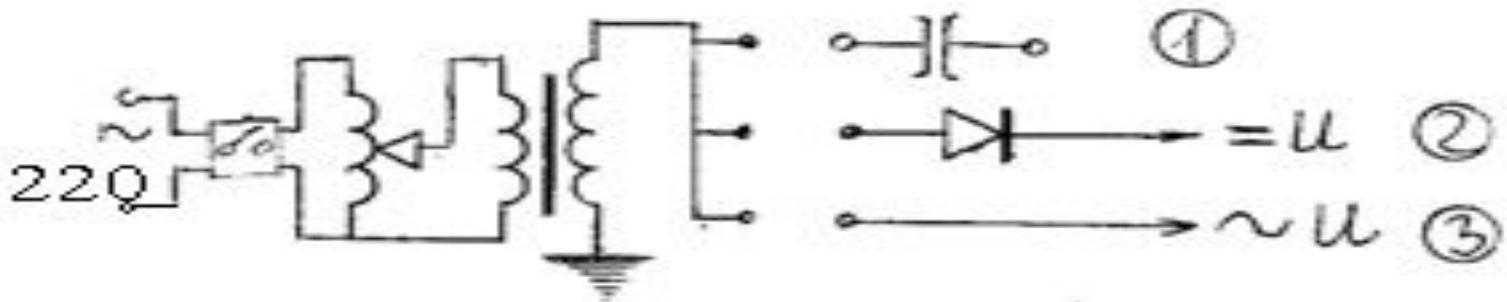
-
-
- Жидкие диэлектрики обладают более высокой электрической прочностью, чем газы в нормальных условиях. Более высокая прочность жидких диэлектриков обусловлена их более высокой плотностью (в 2000 раз) и значительно меньшими межмолекулярными расстояниями.
- Предельно чистые жидкости получить чрезвычайно трудно. Постоянными примесями в жидкости являются вода, газы и мельчайшие механические частицы. Наличие примесей сильно осложняет явление пробоя жидких диэлектриков.
- В жидких диэлектриках возможны следующие виды пробоя:
 - *электрический*, вследствие ударной ионизации;
 - *тепловой* пробой при резко возрастающих диэлектрических потерях и нагрева жидкости в местах наибольшего скопления примесей;
 - *ионизационный*, вследствие ионизации газовых включений жидкости, роста диэлектрических потерь.

• Пробой твердых диэлектриков

- Физическая картина пробоя твердых диэлектриков может быть весьма различна: ионизационные процессы; вторичные процессы, обусловленные сильным электрическим полем E ; нагрев; химические реакции; частичные разряды; механические напряжения в результате электрострикции; образования объемных зарядов на границах неоднородностей и т.д. Поэтому различают несколько механизмов пробоя твердых диэлектриков:
- - электрический
- - тепловой
- - электрохимический
- - ионизационный
- - электромеханический

Методы экспериментального определения электрической прочности

- Электрическая прочность жидких и твердых диэлектриков определяется на установках типа АИИ - 70, позволяющих производить испытания на постоянном и переменном U в пределах от 0 до 70 кВ. Принципиальная схема электрических соединений установки АИИ - 70 дана на рисунке 3.3.



- 1 - резервуар с электродами для испытания жидких диэлектриков;
 - 2 - вывод постоянного U для испытания твердых диэлектриков;
 - 3 - вывод переменного U для испытания твердых диэлектриков.
- Рисунок 5.3 - Электрическая схема испытательной установки АИИ - 70

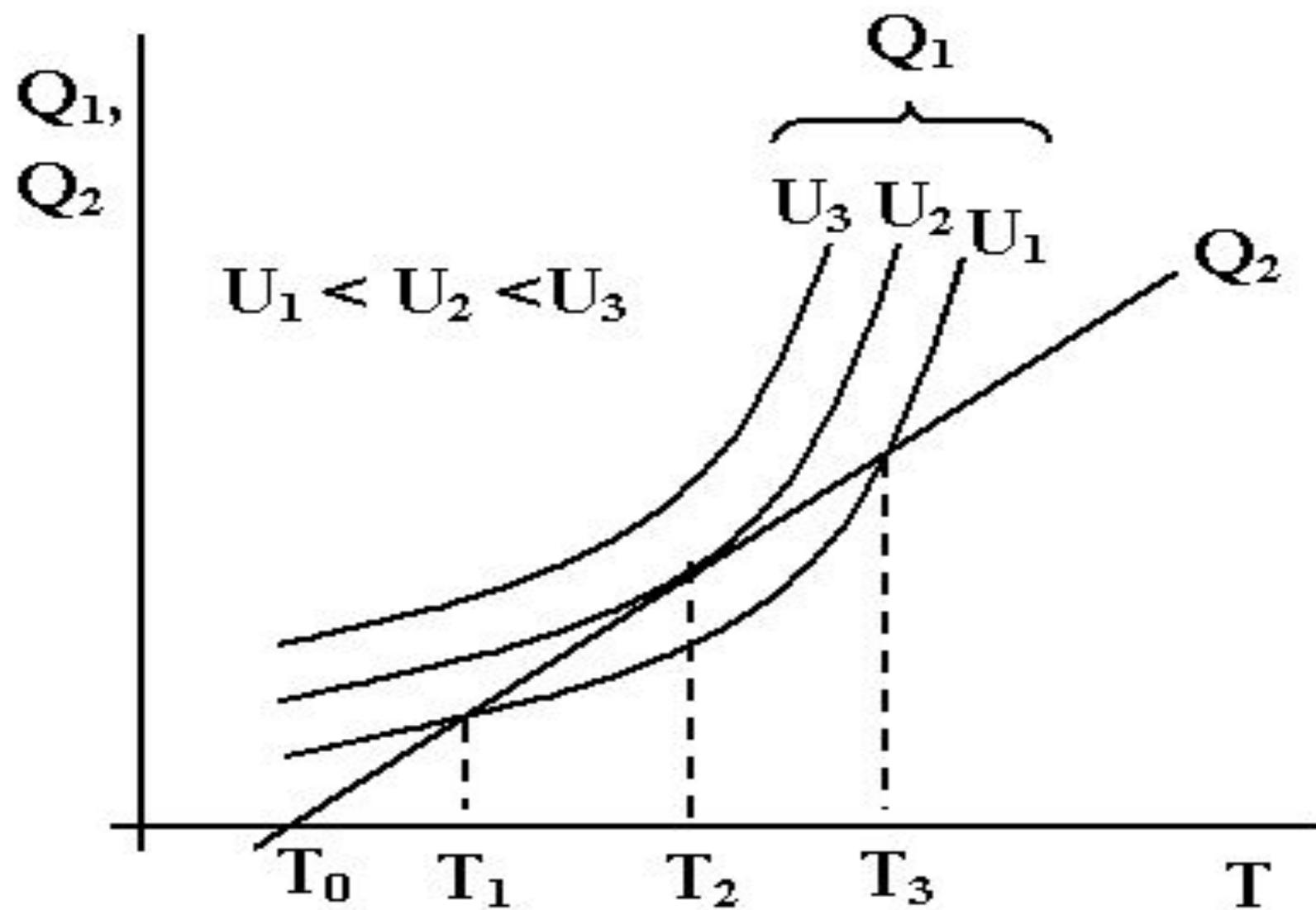
- **Пробивное напряжение и электрическая прочность**
- Минимальное напряжение $U_{пр}$, приложенное к диэлектрику, и приводящее к образованию в нем проводящего канала, называется пробивным напряжением. В зависимости от того замыкает канал или нет оба электрода пробой может быть **полным, неполным** или **частичным**. У твердых диэлектриков возможен также **поверхностный пробой**, после которого повреждается поверхность, образуя так называемый **трекинг**, науглероженный след на органических диэлектриках. Отношение импульсного пробивного напряжения к его статическому больше

- единицы и называется **коэффициентом импульса**. Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения называют **кривой жизни электрической изоляции**. Снижение $U_{пр}$ от времени происходит из-за **электрического старения** изоляции - необратимых процессов под действием тепла и электрического поля. **Электрической прочностью** называют напряженность электрического поля при пробое изоляции в однородном электрическом поле $E_{пр} = U_{пр}/h$, где $E_{пр}$, В/м, $U_{пр}$ - пробивное напряжение, В, h - толщина диэлектрика, м. Кроме В/м электрическую прочность часто выражают в МВ/м или кВ/мм. Соотношение между этими единицами такое: 10^6 В/м = 1 МВ/м = 1 кВ/мм.

- **Электрический пробой** - разрушение диэлектрика, обусловленное ударной ионизацией электронами или разрывом связей между атомами, ионами или молекулами в течение 10^{-5} - 10^{-6} с. $E_{пр}$ при электрическом пробое зависит главным образом от внутреннего строения диэлектрика и практически не зависит от температуры, частоты приложенного напряжения, геометрических размеров образца, вплоть до толщин 10^{-4} - 10^{-5} см. По сравнению с воздухом, у которого $E_{пр} \gg 3$ МВ/м, наибольших значений $E_{пр}$ при электрическом пробое достигает $E_{пр}$ у твердых диэлектриков - 10^2 - 10^3 МВ/м, в то время как у тщательно очищенных жидких диэлектриков составляет примерно 10^2 МВ/м.

- **Электротепловой пробой**
- Электротепловой (тепловой) пробой возможен, когда выделяющееся в диэлектрике за счет электропроводности или диэлектрических потерь тепло Q_1 становится больше отводимой теплоты Q_2 . В результате в месте пробоя происходит прогрессирующий разогрев диэлектрика, сопровождающийся образованием узкого проплавленного канала высокой проводимости.

- Если не учитывать распределение температуры по толщине диэлектрика, то можно легко получить приближенное выражение для анализа зависимости $U_{пр}$ от влияния различных факторов. Пусть
- $$Q_1 = U^2 \omega C tg\delta \quad (4.1)$$
- Если в диэлектрике будут только потери проводимости (неполярный диэлектрик), то $tg\delta = tg\delta_0 \exp[a(T - T_0)]$,
- где a и $tg\delta_0$ зависят от природы диэлектрика, T_0 - температура окружающей среды (электродов), T - температура диэлектрика. Количество отводимого тепла определяется равенством
- $$Q_2 = 2\sigma S(T - T_0) \quad (4.2)$$
- где σ - суммарный коэффициент теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду, S - площадь электрода.

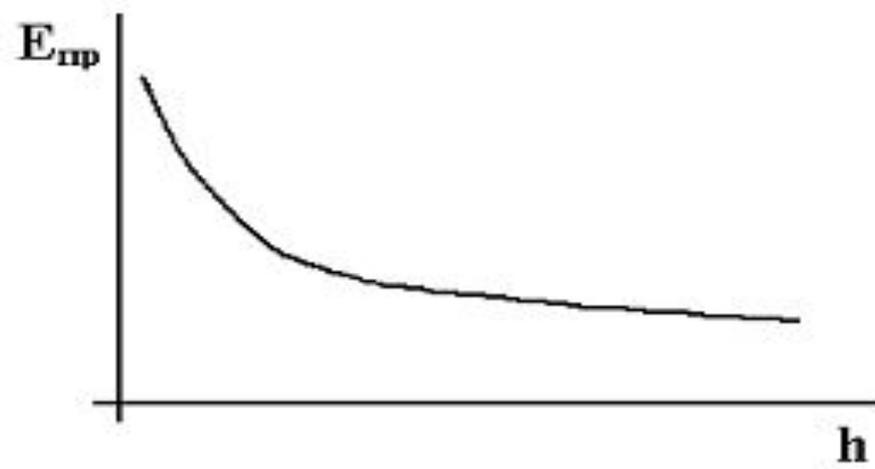
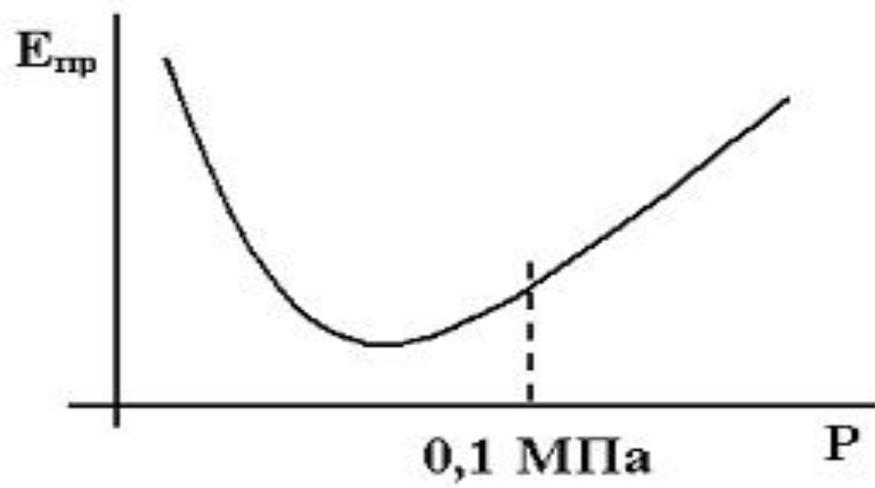


- Из графического представления зависимости Q_1 и Q_2 от температуры (рис. 4.1) видно, что при U_1 и T_1 будет устойчивое тепловое равновесие $Q_1 = Q_2$; при U_2, T_2 и U_1', T_3 - состояние неустойчивого теплового равновесия, при нарушении которого в результате прогрессивного разогрева диэлектрика будет тепловой пробой. Видно, что $U_3 = U_{пр}$. Из условия теплового равновесия
- $$U_{пр} = \sqrt{2\sigma S (T_{кр} - T_0) / (2\pi f C \operatorname{tg}\delta_0)} \cdot \exp[-\alpha(T_{кр} - T_0)/2],$$
- где $T_{кр}$ соответствует температуры T_2 и T_3 .
- Тепловой пробой обычно происходит в течение $10^{-2} - 10^{-3}$ с, а $E_{пр}$ около 10 МВ/м.
- Пробой диэлектрика при тепловом пробое происходит там, где хуже всего теплоотдача. $E_{пр}$ при тепловом пробое уменьшается: при увеличении температуры, времени выдержки образца под напряжением; при увеличении толщины диэлектрика из-за ухудшения теплоотвода от внутренних слоев ($U_{пр}$ с увеличением толщины диэлектрика растет нелинейно).

- **Электрохимический пробой**
- происходит при напряжениях меньших электрической прочности диэлектрика. Вызывается изменением химического состава и структуры диэлектрика в результате электрического старения. Время развития этого вида пробоя $10^3 - 10^8$ с.

- **Пробой газообразных диэлектриков**

- Пробой газов определяется двумя механизмами - лавинным и лавинно-стримерным, связанными с процессами ударной ионизации электронами и фотоионизацией. Для пробоя газа в постоянном однородном поле (рис. 4.2) характерна зависимость $E_{пр}$ от давления. Давление 0,1 МПа соответствует нормальному атмосферному давлению. $E_{пр}$ при больших давлениях растет в связи с уменьшением длины свободного пробега электронов и уменьшением вероятности актов ионизации; возрастание $E_{пр}$ при малых давлениях связано с уменьшением вероятности столкновения электронов с молекулами газа из-за малой плотности газа. $E_{пр}$ воздуха в однородном поле растет, как показано на рис. 4.3 с уменьшением расстояния между электродами из-за уменьшения вероятности столкновения электронов с молекулами газа.



- Пробивное напряжение газов существенно снижается в неоднородных полях, например для воздуха при $h=1$ см от 30 кВ до 9 кВ. В неоднородном поле влияет также полярность электродов. Так для электродов с малым радиусом кривизны $U_{пр}$ при положительной полярности оказывается меньше, чем при отрицательной. Это связано с образованием положительного объемного заряда у острия в результате развития **коронного** разряда, что приводит к возрастанию напряженности поля в остальной части промежутка.

- **Пробой жидких диэлектриков**
- Электрическая форма пробоя, развивающаяся за время 10^{-5} - 10^{-8} с, наблюдается в тщательно очищенных жидких диэлектриках и связывается с инжекцией электронов с катода. $E_{пр}$ при этом достигает 10^7 В/м, В технически чистых жидких диэлектриках пробой носит тепловой характер.
- На электрический пробой жидких диэлектриков влияют многие факторы, числу которых относятся материал электродов, примеси, загрязнение жидкости; дегазация жидкости и электродов; длительность воздействия напряжения; скорость возрастания напряжения и его частоты; температура, давление и др.

- В неочищенных жидкостях пробивное напряжение определяется действующим значением (тепловой характер пробоя), в очищенных-амплитудным (электрическая форма пробоя). Более сильное влияние примесей и загрязнений как жидких, так и газообразных сказывается на низких частотах. Увеличение электрической прочности трансформаторного масла происходит при фильтрации и сушке (при частоте 50 Гц- втрое, на частоте 10^5 Гц- только на 30%).
- Для многих жидкостей в зависимости пробивного напряжения от температуры имеется максимум при температурах 30-80°C, высота которого уменьшается с ростом частоты (в пределах 0,4-12 МГц). Кривая тангенса угла диэлектрических потерь при температуре максимума проходит через минимум.
- Увеличение давления от 60 до 800 мм. рт. ст.

- увеличивает пробивное напряжение на 200-300%.
- Добавка к жидкости частиц вещества с диэлектрической проницаемостью большей, чем у жидкости, приводит к росту тока в несколько раз.