

# №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  $\delta$  - 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  $1 \text{ см}^3$  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,  $\lambda$  – 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  $\alpha$** , равным числу ионизации электронов на единицу длины пути. Эти электроны распределяются в межэлектродном пространстве, образуя **электронную лавину**.
-

## Пробой жидких диэлектриков

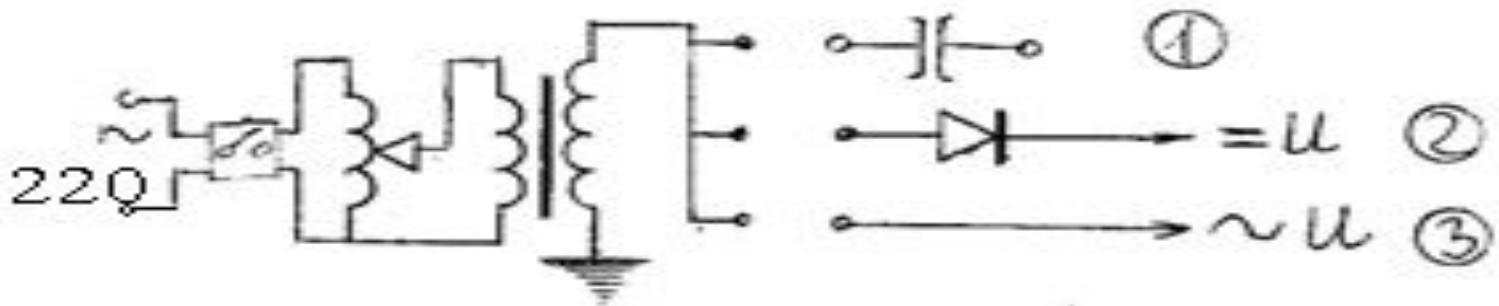
- 
- 
- Жидкие диэлектрики обладают более высокой электрической прочностью, чем газы в нормальных условиях. Более высокая прочность жидких диэлектриков обусловлена их более высокой плотностью (в 2000 раз) и значительно меньшими межмолекулярными расстояниями.
- Предельно чистые жидкости получить чрезвычайно 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

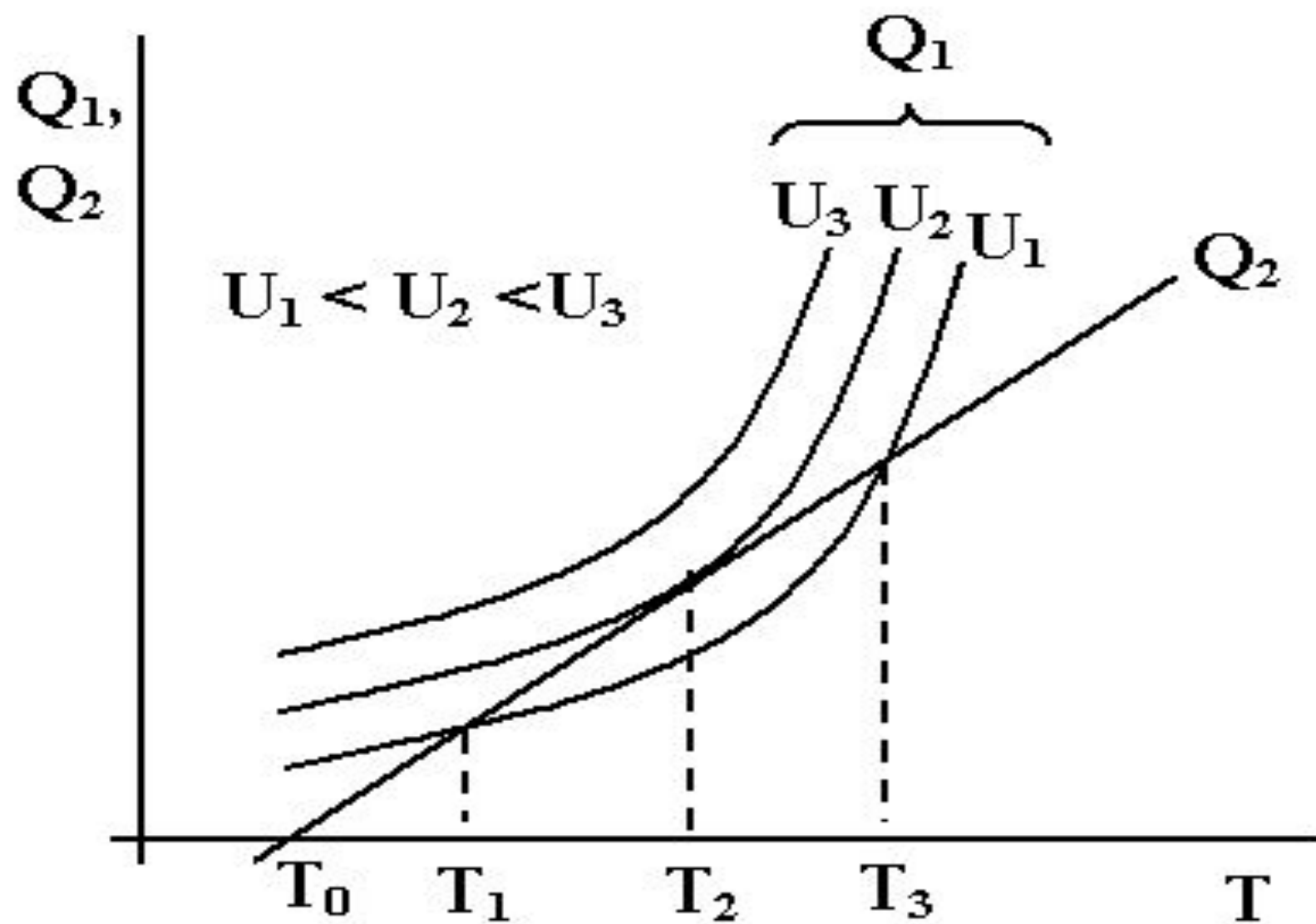


- единицы и называется **коэффициентом импульса**. Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения называют **кривой жизни электрической изоляции**. Снижение  $U_{пр}$  от времени происходит из-за **электрического старения** изоляции - необратимых процессов под действием тепла и электрического 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  $\sigma$  - суммарный коэффициент теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду,  $S$  - площадь электрода.



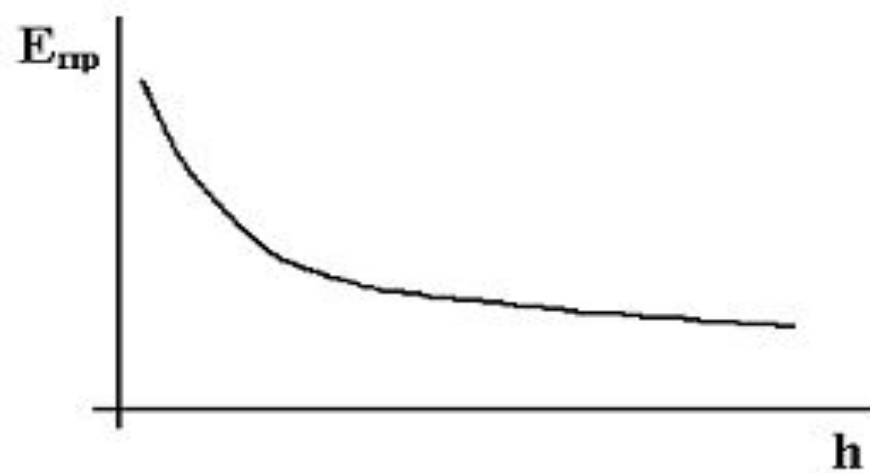
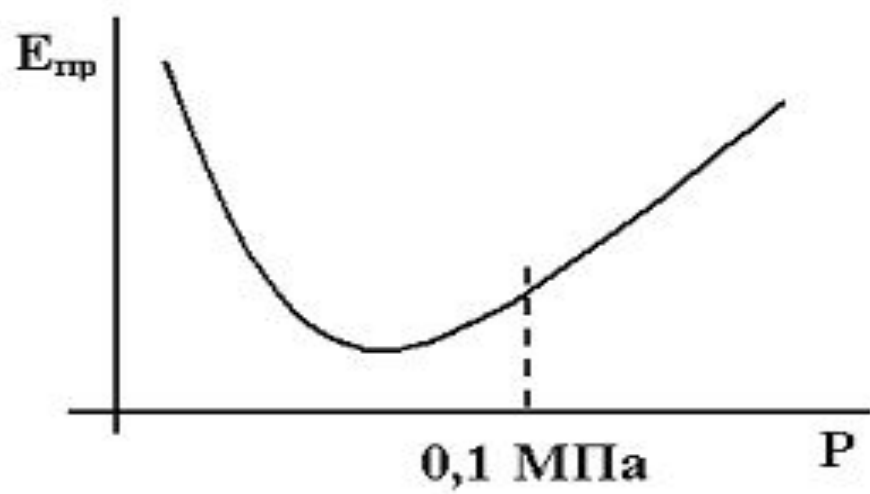
- Из графического представления зависимости  $Q_1$  и  $Q_2$  от температуры (рис. 4.1) видно, что при  $U_1$  и  $T_1$  будет устойчивое тепловое равновесие  $Q_1 = Q_2$ ; при  $U_2, T_2$  и  $U_1', T_3$  - состояние неустойчивого теплового равновесия, при нарушении которого в результате прогрессивного 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.