

Твердые диэлектрики, применяемые в ТВН

Материалы: электрофарфор, фарфор, электрокартон, бумага, кремнийорганические композиции, резина, полимеры.

Основные требования: электрическая прочность, механическая прочность, термостойкость

Электропроводность твердых диэлектриков $10^{-16} - 10^{-8} \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$

Зависимости электропроводности от внешних факторов

$$\gamma = \gamma_0 e^{a(t^\circ C - t_0^\circ C)} \quad a=0.04-0.05 \text{ 1/град}$$

$$\gamma = \gamma_0 e^{b(E - E_0)}$$

Проводимость в основном ионная, в сильных электрических полях - электронная

Характеристики изоляции

Электрические	Механические	Тепловые	Химические	Прочие
$U_{пр}$; $U_{пер}$; $U_{раб}$; $U_{сухо\ разр}$; ρ_V, ρ_S ; $tg \delta$; $t = f(E, f)$	$\sigma_{раст}$; $\sigma_{сж}$; $\sigma_{изг}$; твердость; гибкость; эластичность	$T_{кип}$; $T_{плавл}$; $T_{заст}$; теплопроводность; теплоемкость; тепловое расширение	стабильность; растворимость; действие на другие диэлектрики	удельный вес; абсорбция влаги; действие облучения; микроорганизмы и др.

Пробой твердой изоляции

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой: с пределами $U_{\text{пр тв}} > U_{\text{пр ж}} > U_{\text{пр г}}$.

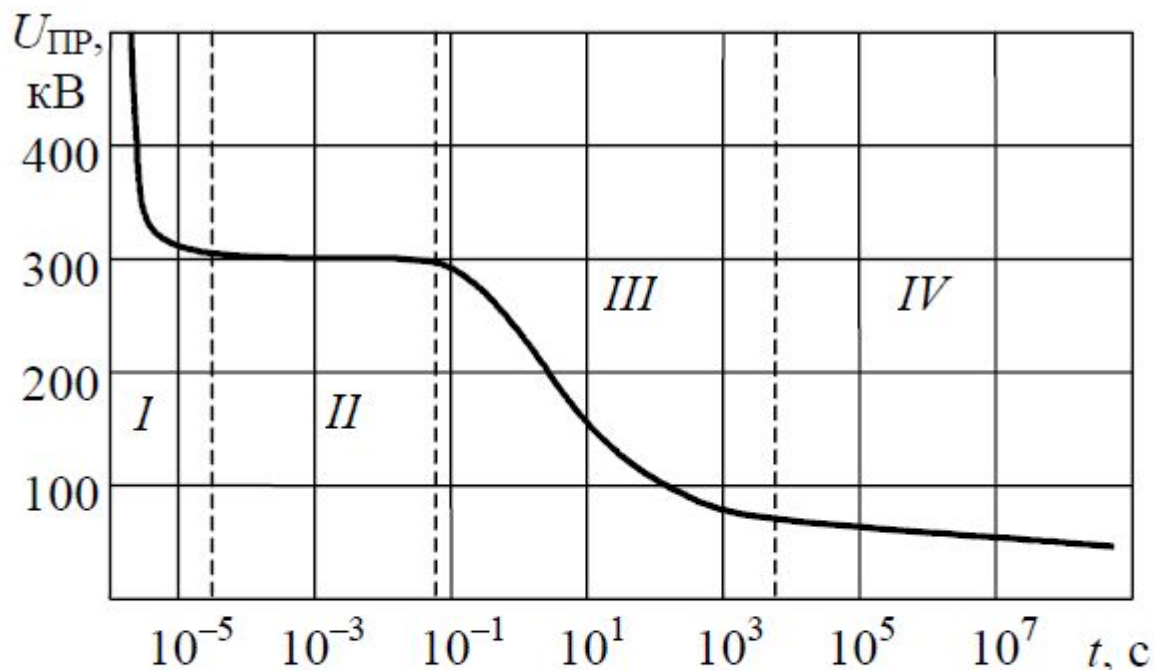
Электрическая прочность твердой изоляции зависит:

- 1) от формы электрического поля;
- 2) вида напряжения и полярности;
- 3) времени воздействия напряжения;
- 4) однородности диэлектрика;
- 5) электрофизических характеристик (полярный-неполярный, $\text{tg}\delta$, ϵ , γ и др.);
- 6) температуры.

Виды пробоя твердого диэлектрика

- 1) Электрический пробой $E_{\text{пр}} \approx 100 \text{ кВ/мм}$
- 2) Тепловой пробой $E_{\text{пр}} \approx 10\text{-}100 \text{ кВ/мм}$
- 3) Старение $E_{\text{пр}} \leq 10 \text{ кВ/мм}$

Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность твердого диэлектрика



Вольт-секундная характеристика твердой изоляции

I – электрический пробой, запаздывание развития канала разряда;

II – электрический пробой, $t < 0,1$ с, не зависит от температуры;

III – тепловой пробой, $t > 0,1$ с, резкое снижение $U_{пр}$ во времени;

IV – старение, $U_{пр}$ мало изменяется, а время до пробоя возрастает

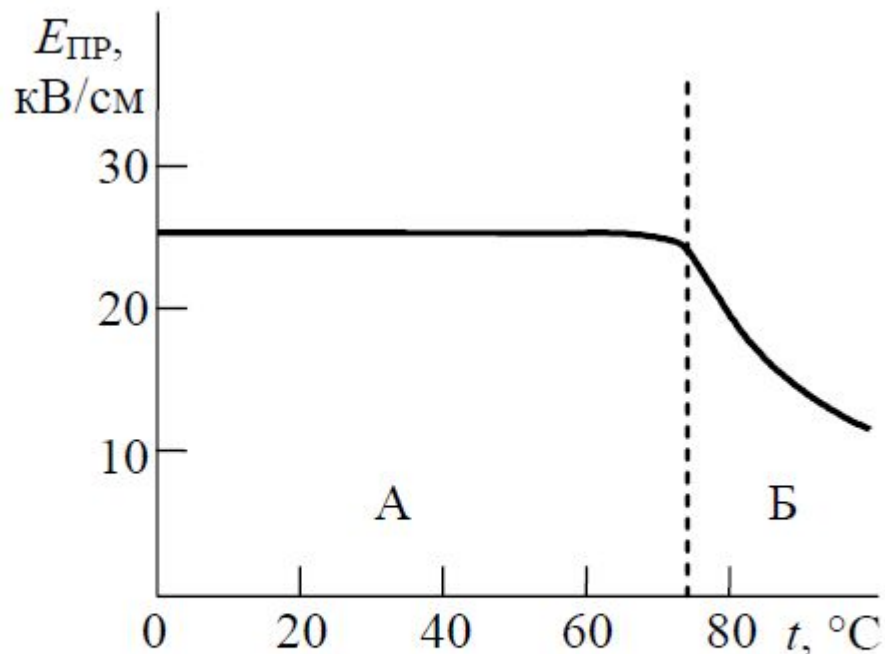
значительно

Влияние толщины (d) твердого диэлектрика на электрическую прочность ($E_{пр}$)

$d \downarrow \rightarrow E_{пр} \uparrow$

Эффект применяется в конденсаторной и кабельной технике путем применения тонкопленочных диэлектриков

Влияние температуры. Тепловой пробой твердого диэлектрика



Зависимость пробивного напряжения от температуры для фарфора (напряжение 50 Гц)

Физическая картина развития теплового пробоя

$$P_{\text{выд}} = E^2 \omega \cdot \text{tg} \delta \cdot S \cdot d \quad P_{\text{отв}} = 2\alpha(T - T_0) \cdot S \quad S - \text{площадь обкладок}$$

$$\text{tg} \delta = \text{tg} \delta_0 \cdot e^{\beta(T - T_0)}$$

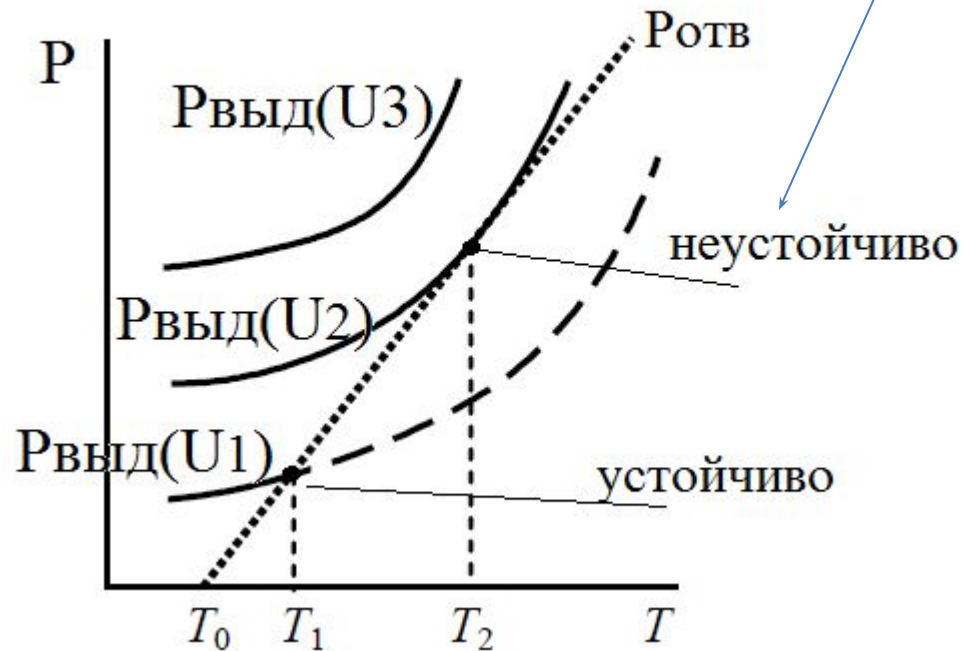
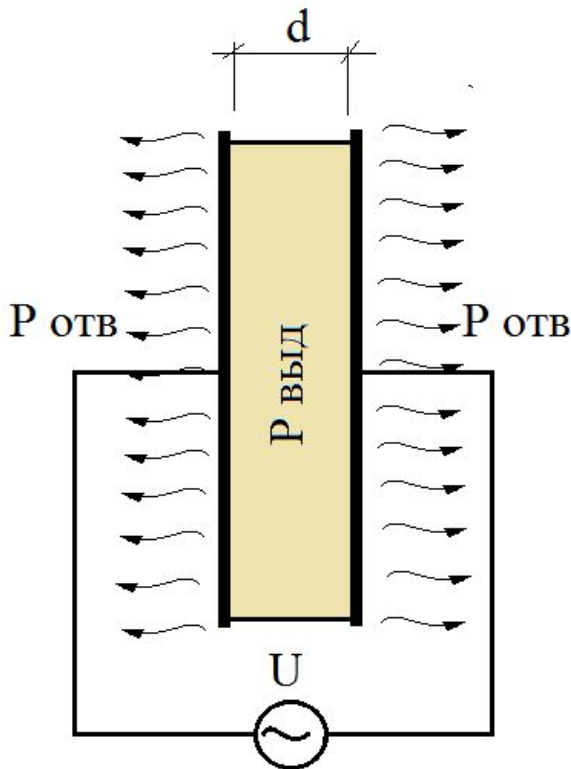
$$E = \frac{U}{d}$$

Точка предельного равновесия

$$P_{\text{выд}} = P_{\text{отв}} \quad \leftarrow \text{Тепловое равновесие}$$

$$\frac{\partial P_{\text{выд}}}{\partial T} = \frac{\partial P_{\text{отв}}}{\partial T}$$

$$U_{\text{пр}} \sim \sqrt{d}$$



Частичные разряды в твердых изолирующих материалах

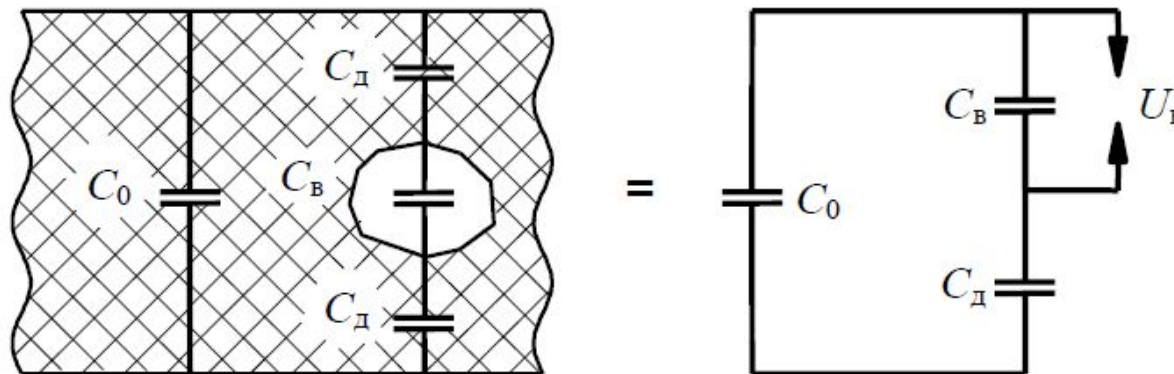


Схема замещения твердого диэлектрика:

C_0 – емкость бездефектной изоляции; C_B – емкость воздушного включения; C_D – емкость диэлектрика последовательно с включением;
 U_B – напряжение пробоя воздушного включения

$$C_{\Sigma} = C_0 + \frac{C_B \cdot C_D}{C_B + C_D} \quad E_B = E_D \cdot \frac{\epsilon_D}{\epsilon_B} \quad \Rightarrow \quad E_B \gg E_D$$

Пробой включений $\Delta U_B = 250-300$ В т.е. вблизи минимума кривой Пашена

При этом нейтрализуется заряд $\Delta Q = \Delta U_{пр} C_B \Rightarrow$

Возникает скачок напряжения на емкости объекта $q_x = C_{\Sigma} : \Delta U_x$

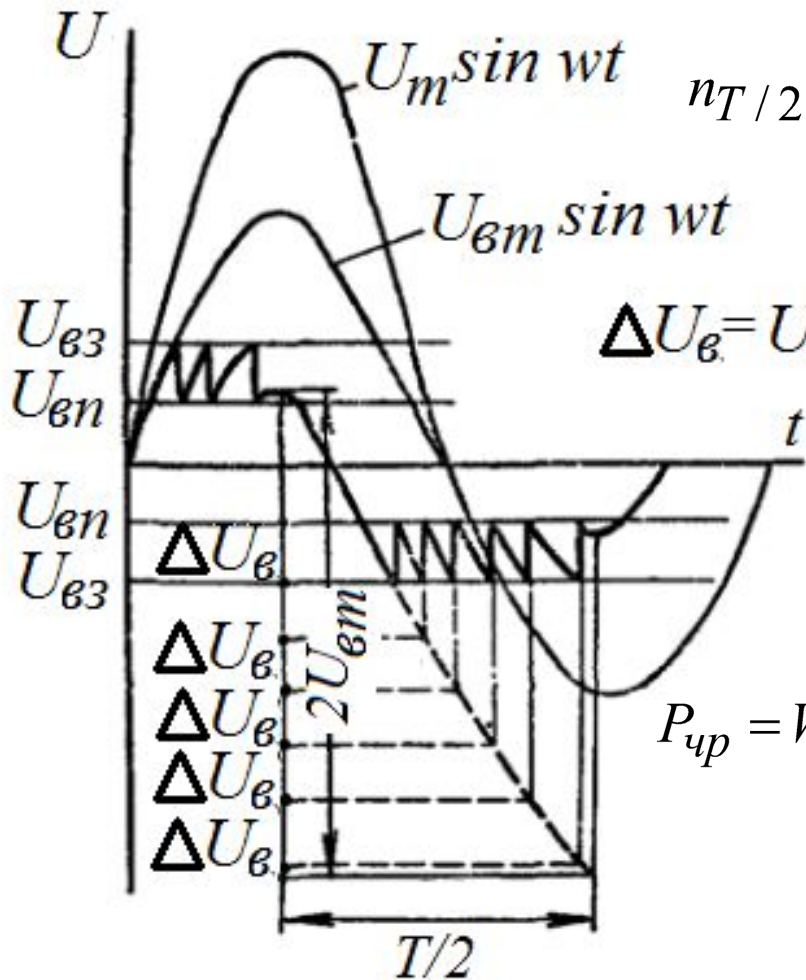
Нормируемой величиной (по МЭК) является т. н.

кажущийся заряд q_x , определяемый по скачку напряжения на электродах

$$\text{Кажущийся заряд } q_x = \Delta U_x C_x = \Delta Q \frac{C_D}{C_D + C_e}$$

Частичные разряды при переменном напряжении

Интенсивность ч.р.



$$n_{T/2} = \frac{2U_{вм} - (U_{вз} + U_{вн})}{U_{вз} - U_{вн}} = \frac{2U_m - (U_з + U_н)}{U_з - U_н}$$

$$U_{вн} \approx 0.9U_{вз}$$

Энергия, рассеиваемая в одном ч.р.

$$W_{чр} = \frac{C_e}{2} (U_{вз}^2 - U_{вн}^2) \approx C_e U_{вз} (U_{вз} - U_{вн})$$

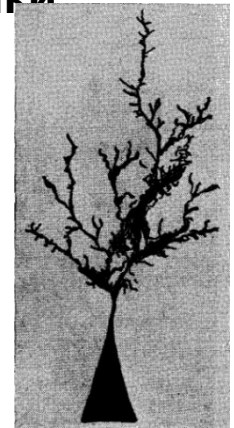
Мощность, расходуемая на 1 чр

$$P_{чр} = W_{чр} \cdot (2fn_{T/2}) = 2fC_e U_{вз} [2U_{вм} - (U_{вз} + U_{вн})]$$

$$P_{чр} \sim fU$$

Разрушающее воздействие частичных разрядов на диэлектрики

- 1) Воздействие ударных волн
- 2) Тепловое воздействие
- 3) Бомбардировка заряженными частицами
- 4) Воздействие химически активными продуктами разряда (озон, окислы азота)
- 5) Воздействие излучения
- 6) Развитие древовидных побегов - дендритов



Дендрид в полиэтилене

Классификация и природа частичных разрядов

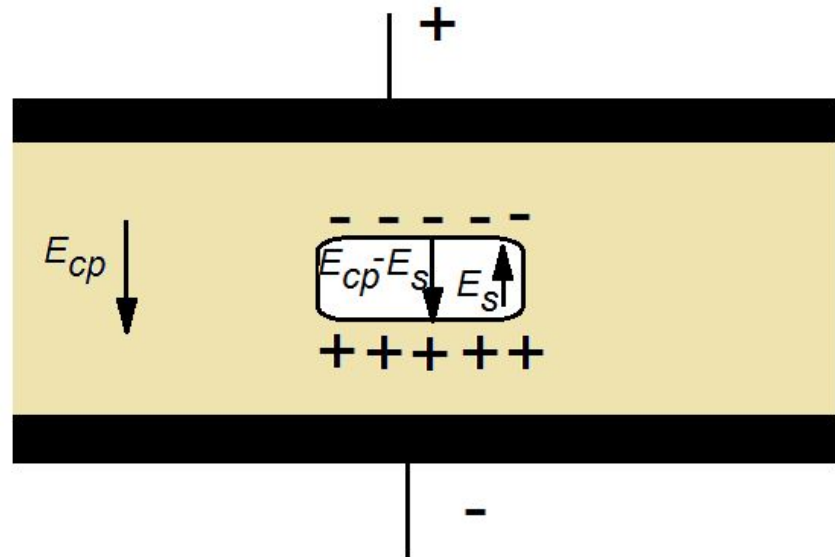
1. **Начальные** ч.р. $q_x=1-10$ пКл. Возникают при некотором значении напряжения U_n . Вызывают медленное (от тысячи часов до нескольких лет) разрушение изоляции. Физическая природа – электронные лавины во включениях или местах резкого усиления поля. Начальные ч.р. - неустойчивы

2. **Критические** ч.р. $q_x>1000$ пКл. Для критических ч.р. характерно резкое увеличение интенсивности в области $U=U_k > U_n$ (U_k – напряжение критических ч.р.). Это сравнительно мощные стримерные разряды, разлагающие некоррозионостойкие органические материалы с выделением газа и образованием полостей и трещин. Появление критических ч.р. При эксплуатации в/в оборудования недопустимо, т.к. ведет к быстрому (от нескольких секунд до нескольких минут) пробою изоляции.

Частичные разряды при постоянном напряжении

Временной интервал между последовательными ч.р. составляет секунды – десятки секунд, так как время восстановления напряжения после ч.р. при постоянном внешнем напряжении определяется электропроводностью диэлектрика, которая крайне низка.

Интенсивность ч.р. при постоянном напряжении на несколько порядков ниже допустимы более высокие рабочие напряженности электрического поля.



Частичные разряды при импульсном напряжении

Принципиально не отличаются от ч.р. на переменном напряжении. При каждом приложении импульса напряжения, например при перенапряжениях в сетях ВН, возникают вспышки ч.р. В результате многократного воздействия импульсных перенапряжений возникает кумулятивный эффект – накопление повреждений и пробой изоляции