

*Диэлектрические
потери*



В электрическом поле диэлектрики нагреваются, т.к. часть энергии электрического поля рассеивается в диэлектриках в виде тепла.

Рассеиваемая за единицу времени энергия называется **диэлектрическими потерями (ДП)**.

Нагрев диэлектриков приводит к ухудшению их свойств и ускорению процессов старения:

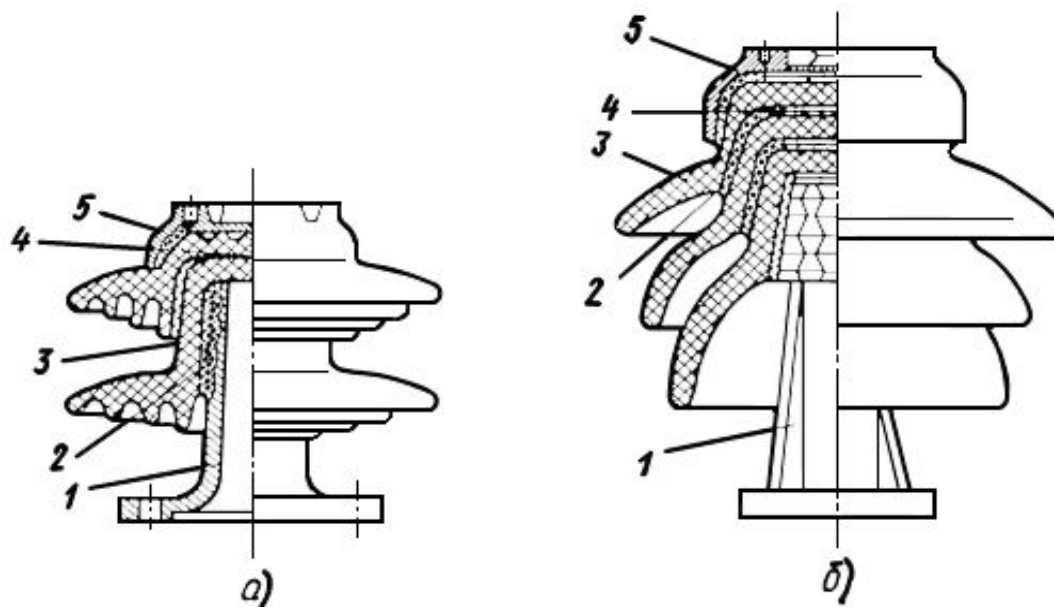
- в **силовой электротехнике** нагрев приводит к **уменьшению электрической прочности**, а значит к уменьшению надежности оборудования;
- в **слаботочных устройствах** нагрев приводит к **уменьшению сопротивления изоляции**, т.е. к повышению токов утечки в цепях.

Диэлектрические потери используются для *термообработки материалов*, которая называется *диэлектрическим нагревом* (для полимеризации некоторых изделий из пластмасс).

Диэлектрический нагрев отличается от классических способов нагрева тем, что он протекает равномерно по всему объему и не возникает внутренних механических напряжений в результате неравномерности распределения температуры.

Количественная оценка ДП

- **Абсолютная величина ДП** – P_a (мощность, рассеиваемая в диэлектрике в виде тепла);
- **Удельные ДП** - $p_{уд}$, т.е. диэлектрические потери, приходящиеся на единицу объема материала;
- **Угол ДП** δ и **тангенс** этого угла $tg\delta$, которые не зависят от объема диэлектрика и характеризуют качество самого материала.



Схемы замещения диэлектрика

- Идеальный диэлектрик
(без потерь)



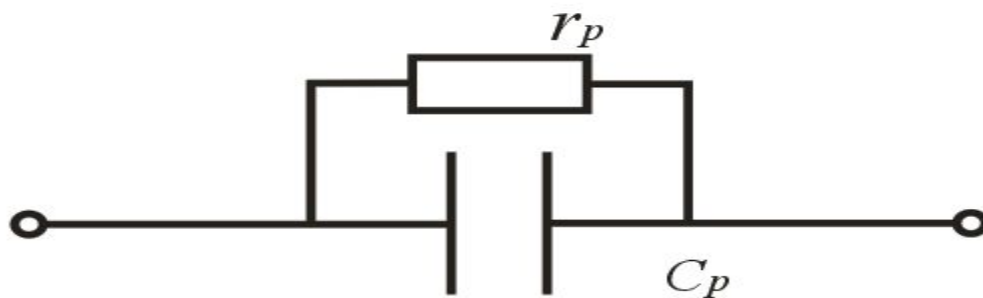
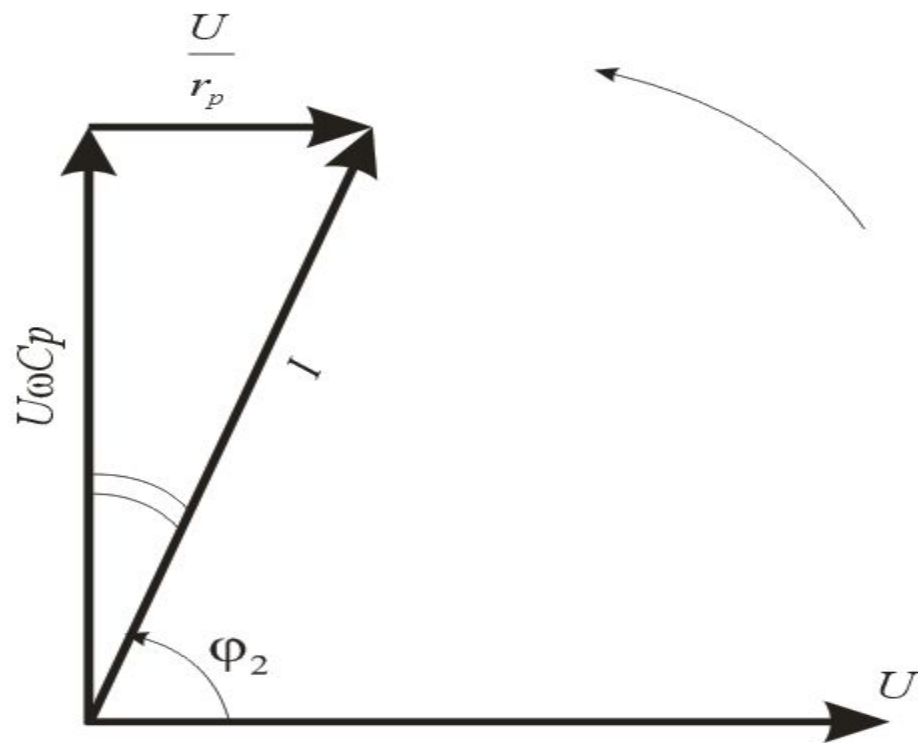
$$\varphi = 90^\circ, \delta = 0$$

Реальный диэлектрик

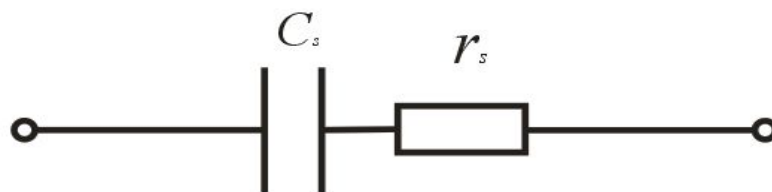
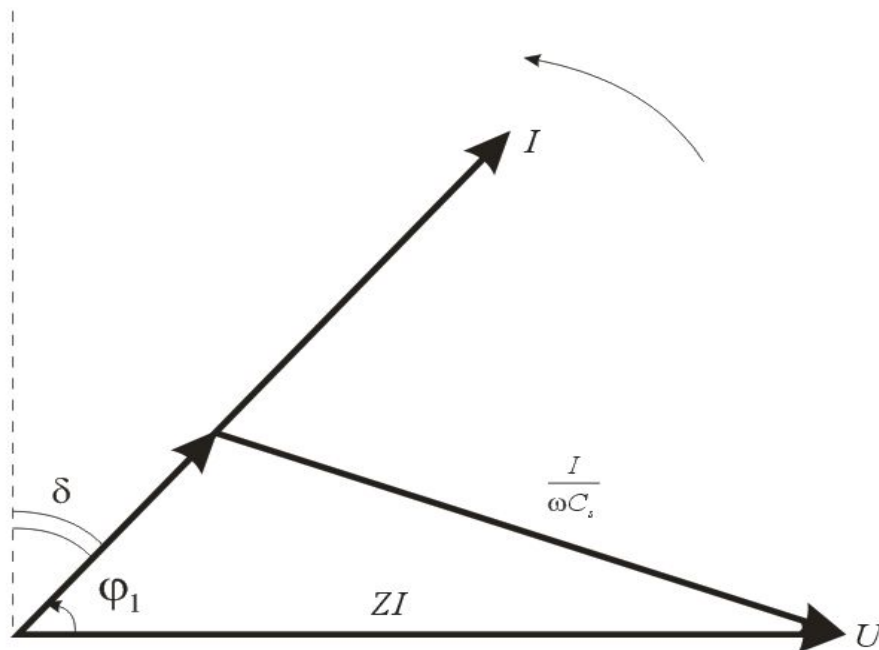


$$\varphi < 90^\circ, \delta \neq 0$$

Параллельная схема замещения



Последовательная схема замещения



Последовательная схема замещения

Мощность ДП определяется по формуле:

$$Pa = \frac{U^2 \operatorname{tg} \delta \cdot \omega \cdot C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{r_s}{x_s}$$

Параллельная схема замещения

Мощность ДП определяется по формуле:

$$Pa = U^2 \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot Cp$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{r_p \omega \cdot Cp}$$

$\operatorname{tg} \delta$ и ДП не зависят от схемы замещения, но емкости значительно различаются:

$$Cp = \frac{Cs}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

Для высококачественных диэлектриков $tg\delta \ll 1$,
поэтому для последовательной схемы:

$$Pa = \frac{U^2 tg\delta \cdot \omega \cdot C_s}{1 + tg^2 \delta} = U^2 \omega \cdot C_s \cdot tg\delta$$

Для параллельной схемы замещения:

$$Pa = U^2 \omega \cdot tg\delta \cdot C_p$$

Тогда $C_p = C_s = C$ и $Pa = U^2 \omega \cdot C \cdot tg\delta$

ДП зависят от величины приложенного напряжения, частоты, а также от свойств самого диэлектрика: ϵ и $tg\delta$.

Виды диэлектрических потерь

- ДП , обусловленные поляризацией (в диэлектриках с релаксационными видами поляризации);
- ДП, обусловленные сквозной электропроводностью (во всех диэлектриках);
- ДП, обусловленные ионизацией (происходят в сильных электрических полях);
- ДП, обусловленные неоднородностью структуры (только в твердых диэлектриках неоднородной структуры).

Процессы поляризации, электропроводности и ионизации независимы, следовательно *ДП* являются суммой составляющих, вызванных отдельными механизмами потерь.

- *ДП, обусловленные релаксационными видами поляризации наблюдаются:*
 - *в полярных диэлектриках;*
 - *в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов;*
 - *в сегнетоэлектриках;*
 - *в диэлектриках неоднородной структуры;*
 - *при высоких частотах наблюдаются **резонансные потери**, связанные с резонансной поляризацией.*

- ДП , обусловленные сквозной электропроводностью

Для данного вида потерь :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho} \quad (1)$$

$$Pa = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = U^2 2\pi f C \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho}$$

т.е. ДП данного вида не зависят от частоты, а $\operatorname{tg} \delta \approx \frac{1}{f}$

ДП возрастают с увеличением температуры по экспоненте:

$$Pat = A \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad , \text{ где } A \text{ и } b -$$

постоянные материала.

Или $P_{at} = P_{a0} \cdot \exp(\alpha t)$, где P_{at} – потери при определенной температуре; P_{a0} – потери при 0°C
 α - постоянная материала.

Ионизационные потери.

Данный вид ДП характерен для газов и проявляется в диэлектриках пористой структуры:

$$P_{ai} = A_1 \cdot f (U - U_i)^3$$

где A_1 - постоянный коэффициент, f – частота электрического поля, U – приложенное напряжение, U_i – напряжение ионизации.

ДП, обусловленные неоднородностью структуры наблюдаются:

- в слоистых диэлектриках ;
- в пористой керамике;
- в пропитанной бумаге и т.п.

Диэлектрические потери в газах

- В слабых электрических полях:

Так как все газы либо неполярны, либо слабополярны, то в них отсутствуют потери на поляризацию. Есть потери только на электропроводность.

Для газов $\varepsilon \approx 1$, $\rho \approx 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и при $f=50 \text{ Гц}$

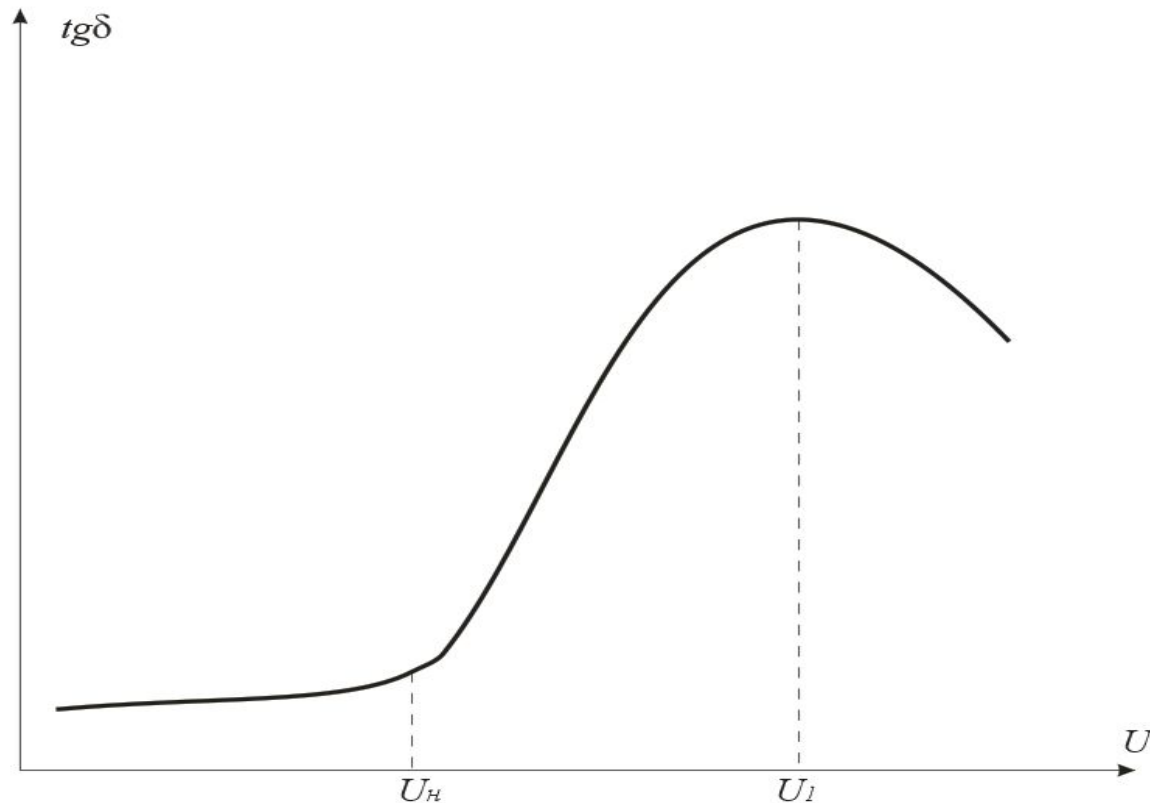
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho} = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{1 \cdot 50 \cdot 10^{16}} = 4 \cdot 10^{-8}$$

Таким образом газы являются практически идеальными диэлектриками в слабых электрических полях.

□ В сильных электрических полях:

Так как в сильных электрических полях развивается ударная ионизация, то появляются потери на ионизацию и $tg\delta$ увеличивается.

Зависимость $tg\delta$ от величины приложенного напряжения называется кривой ионизации.



Диэлектрические потери в жидких диэлектриках

- *Неполярные жидкие диэлектрики* - в них нет потерь на поляризацию (*электронная поляризация*), присутствуют потери на электропроводность, но т.к. γ мала, то малы и *ДП*, а $tg\delta$ может быть рассчитан по формуле (1).

Диэлектрические потери зависят от *температуры* (увеличиваются по экспоненте при повышении температуры) и *не зависят от частоты* внешнего электрического поля.

