

*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:*

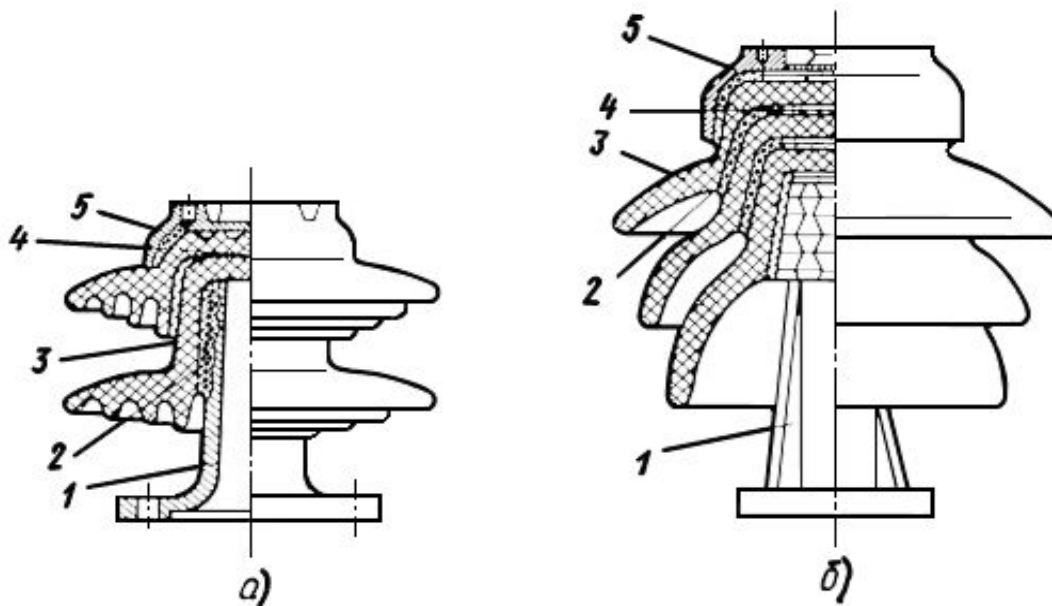
- в **силовой электротехнике** нагрев приводит к **уменьшению электрической прочности**, а значит к уменьшению надежности оборудования;
- в **слаботочных устройствах** нагрев приводит к **уменьшению сопротивления изоляции**, т.е. к повышению токов утечки в цепях.

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**  $\delta$  и **тангенс** этого угла  $tg\delta$ , которые не зависят от объема диэлектрика и характеризуют качество самого материала.



## Схемы замещения диэлектрика

- Идеальный диэлектрик  
( без потерь)



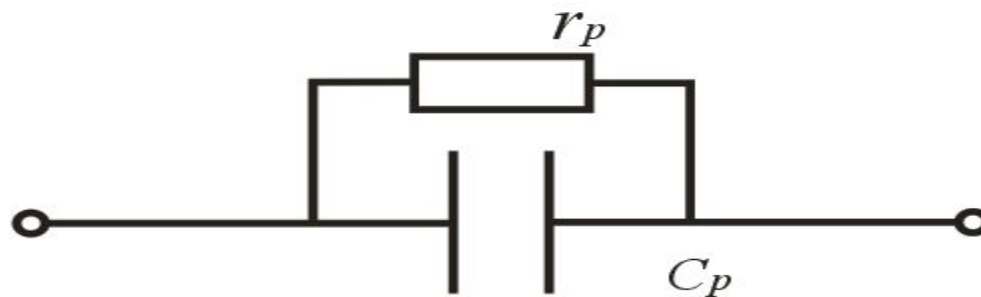
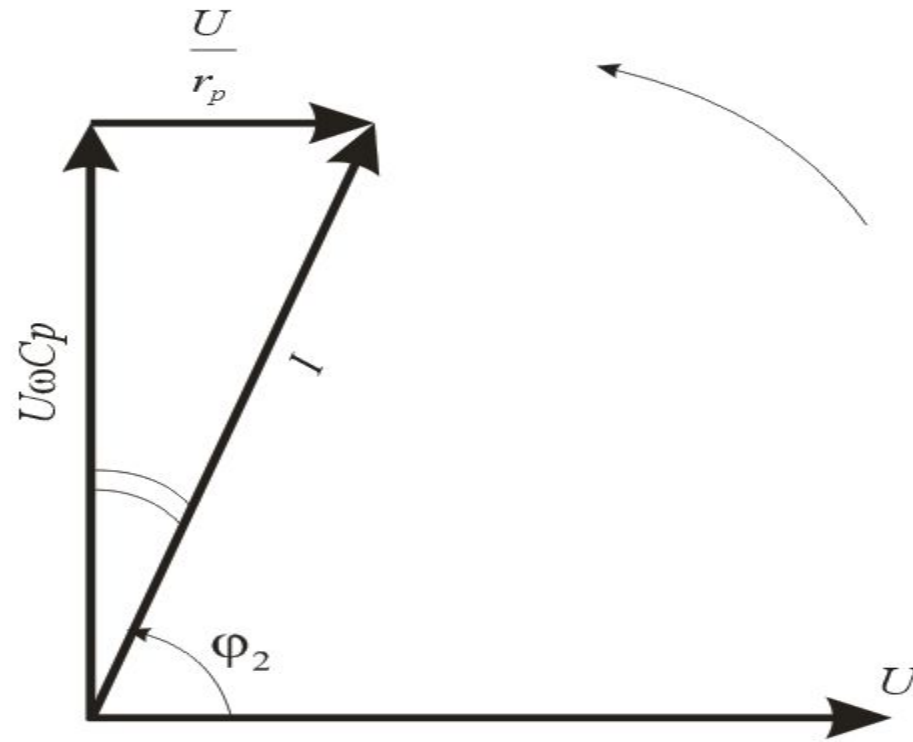
$$\varphi = 90^\circ, \delta = 0$$

Реальный диэлектрик

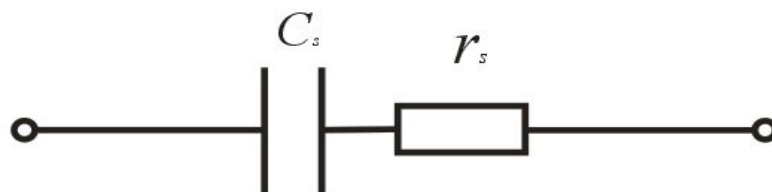
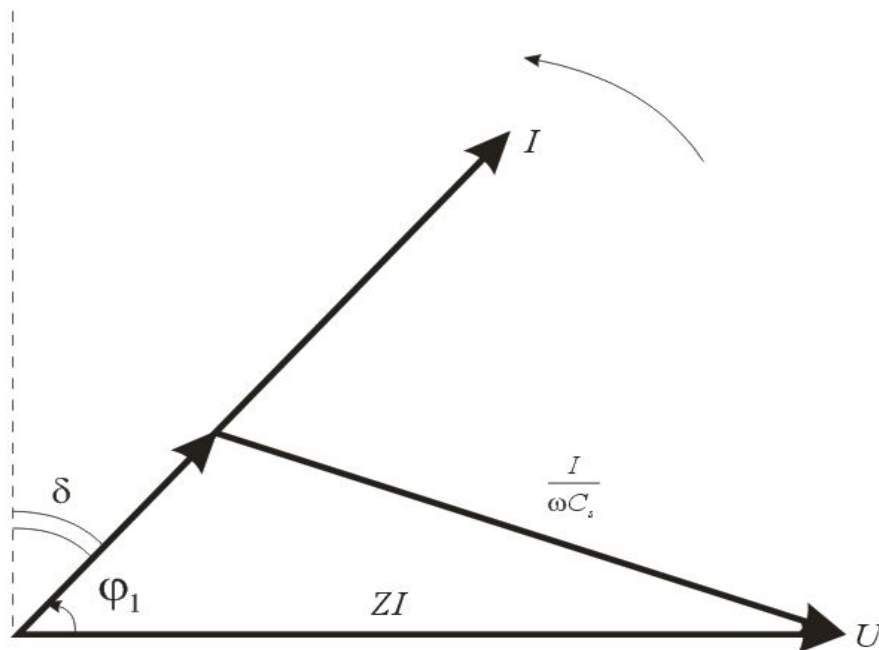


$$\varphi < 90^\circ, \delta \neq 0$$

## 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:  $\epsilon$  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  $0^\circ \text{C}$   
 $\alpha$  - 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  $f=50 \text{ Гц}$

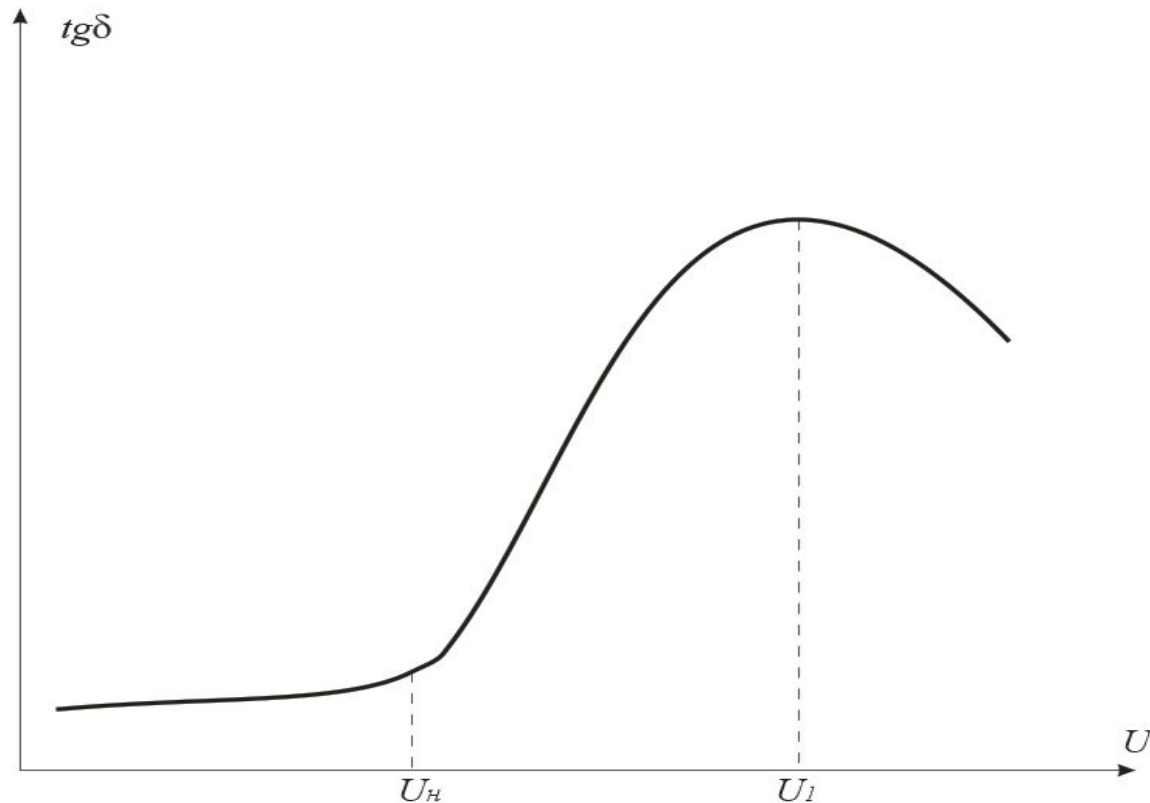
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho} = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{1 \cdot 50 \cdot 10^{16}} = 4 \cdot 10^{-8}$$

*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.  $\gamma$  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.



