

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2019 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Диэлектрическими потерями называется энергия, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии на него электрического поля E и вызывающая *нагрев диэлектрика*.

Диэлектрические потери наблюдаются как при *переменном*, так и при *постоянном напряжении*.

В постоянном поле:

потери ***P*** в диэлектрике обусловлены выделением тепла Джоуля при прохождении сквозного тока:

$$***P = U^2/R*** ,$$

R – сопротивление диэлектрика,

U – приложенная разность потенциалов.

В переменном поле:

$$U = U_0 \cdot \sin \omega t$$

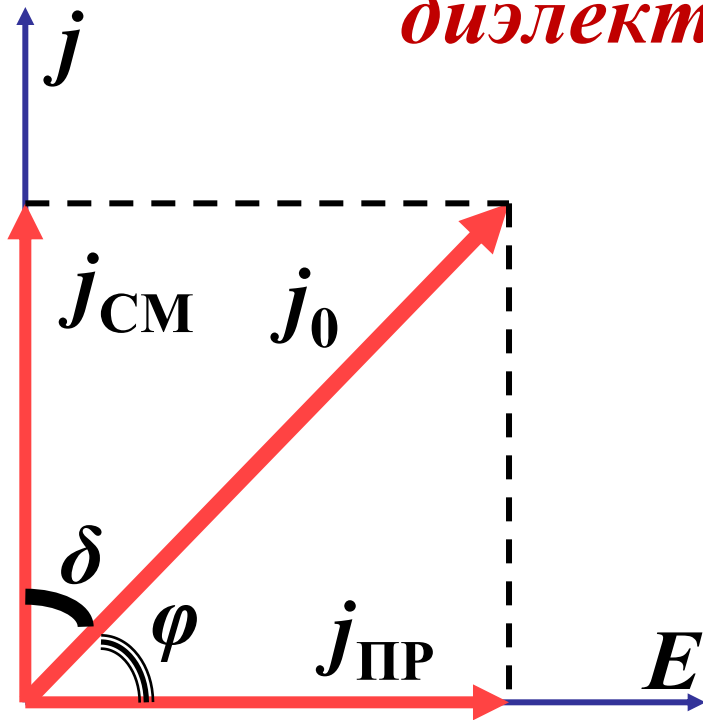
U_0 – амплитуда,

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота переменного напряжения.

Энергия поля затрачивается на:

1. выделение тепла Джоуля;
2. медленные виды поляризации.

Векторная диаграмма токов в диэлектрике конденсатора



Полный ток через конденсатор
– $I(j_0)$

$$j_{\text{СМ}} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega E \quad \text{А/м}^2$$

$$j_{\text{ПР}} = \gamma E \quad \text{А/м}^2$$

$$\text{tg } \delta = \frac{j_{\text{ПР}}}{j_{\text{СМ}}} = \frac{j_{\text{a}}}{j_{\text{c}}} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega}$$

Добротность:

$$Q = 1/\text{tg } \delta$$

Ток через емкость – $I_{\text{c}}(j_{\text{c}})$, диэлектрик – конденсатор

В «*идеальном*» диэлектрике ток проводимости $I_a=0$. В переменном поле ток, протекающий через конденсатор — это ток смещения в диэлектрике $I=I_r$.

В «*идеальном*» диэлектрике ток I опережает по фазе вектор напряжения E на 90° .

В *хороших диэлектриках* угол сдвига фаз φ близок к 90° .

Угол δ , дополняющий угол φ до 90° :

$$\delta = 90^\circ - \varphi.$$

наз. *углом диэлектрических потерь*.

Отношение активной и реактивной составляющих полного тока:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_r,$$

наз. *тангенсом угла диэлектрических потерь*, который м.б. определён экспериментально.

Потери на проводимость: $P = U^2/R$

$$I_a = U/R_a \quad \Rightarrow \quad P = U \cdot I_a ;$$

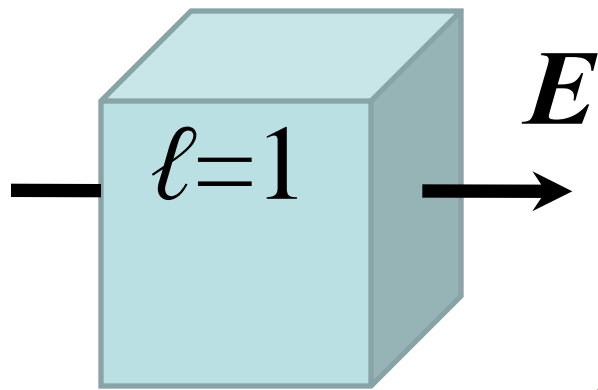
$$I_a = I_r \operatorname{tg} \delta \quad \Rightarrow \quad P = U \cdot I_r \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

$$I_r = U \cdot \omega \cdot C \quad \Rightarrow \quad P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [\text{Вт}]$$

Чем больше $\operatorname{tg} \delta$ изоляции, тем сильнее она нагревается в переменном поле.

Для неоднородного диэлектрика или поля, формула даёт среднее значение потерь по всему объёму диэлектрика - ***полные диэлектрические потери.***

Удельными диэлектрическими потерями p называется мощность, рассеиваемая в данном единичном **объёме диэлектрика**.



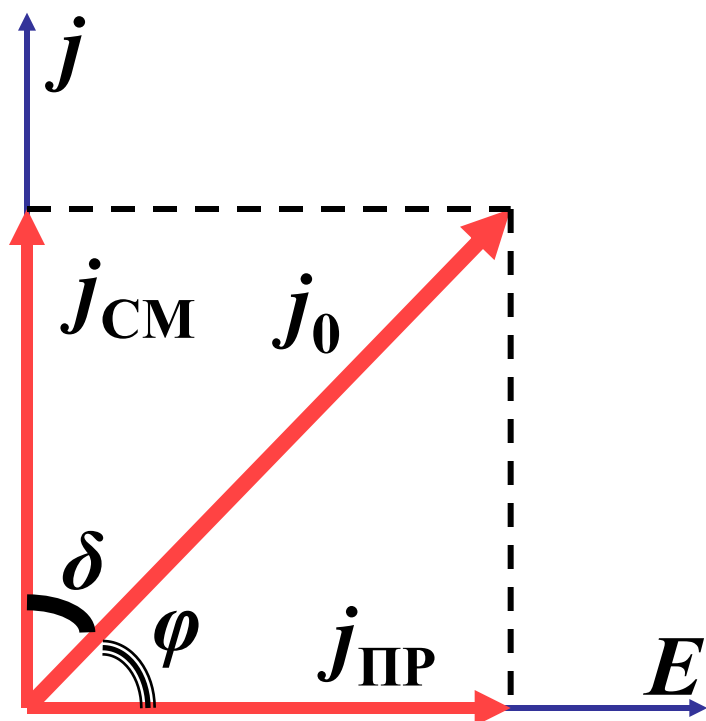
$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \Delta, \quad \Delta = S/l,$$
$$U = E \cdot l$$

$$p = E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [\text{Вт/м}^3].$$

Чем больше ε и $\operatorname{tg} \delta$, тем больше потери p в данном месте диэлектрика.

$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ – коэффициент диэлектрических потерь.

Чтобы понять **причину возникновения потерь** в диэлектрике, необходимо **выяснить причину возникновения фазового отставания** тока I от приложенного переменного напряжения E .



Стремятся **снизить** $\text{tg}\delta$ диэл. материалов, что возможно, если **известна природа диэлектрических потерь**.

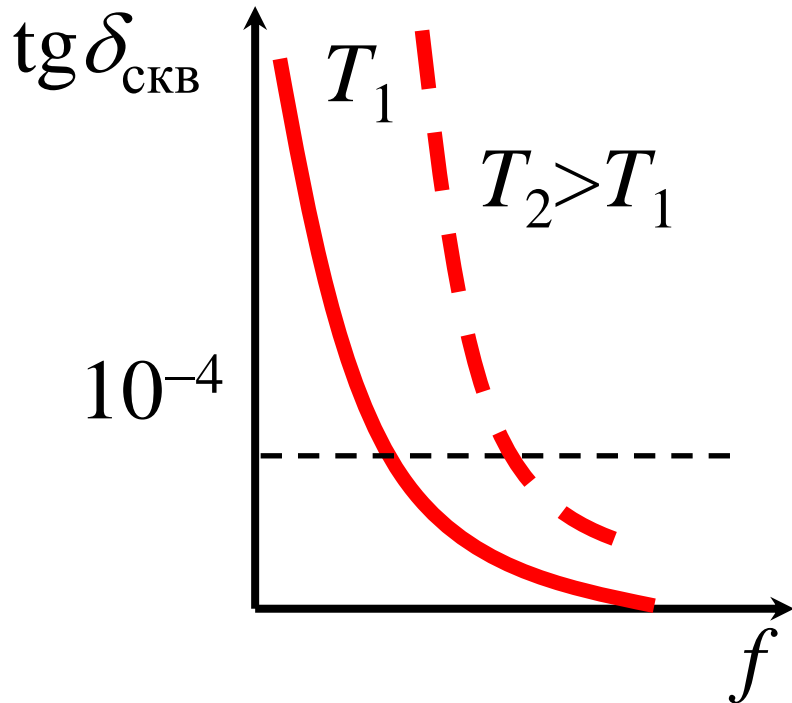
Виды диэлектрических потерь

- *Потери на сквозную электропроводимость.*
- *Потери на медленные виды поляризации.*
- *Потери на неоднородность структуры диэлектрика.*
- *Ионизационные потери.*
- *Резонансные потери.*

Диэлектрические потери на сквозную электропроводимость

наблюдаются **во всех** диэлектриках

$$P_{\text{СКВ}} = \gamma \cdot E^2 \quad \text{tg } \delta_{\text{СКВ}} = \frac{\gamma_{\text{СКВ}}}{\omega \epsilon \epsilon_0} = \frac{1,8 \cdot 10^{-10}}{f \epsilon \rho_v}$$

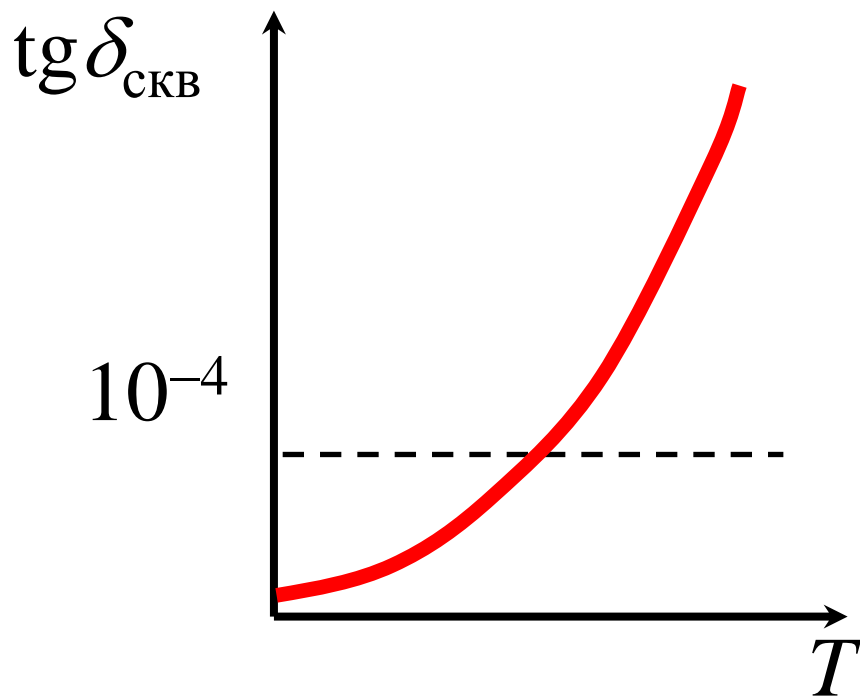


При $\rho > 10^{10}$ Ом·м и $f > 10$ кГц,
 $\text{tg } \delta_{\text{СКВ}} < 10^{-4}$.

Потери существенны лишь при $50 < f < 1000$ Гц, при повышенных $T (> 100^\circ \text{C})$ и при снижении ρ (увлажнение).

С ростом T *потери* экспоненциально *возрастают* из-за *роста проводимости* γ :

$$P_T = P_0 \cdot \exp(\alpha T)$$



P_T – потери при T ;

P_0 – потери при

$T = 0^\circ\text{C}$ (или 20°C);

α – постоянная,

определяемая свойствами диэлектрика.

Тепловые флуктуации (увеличение T) приводят к *диссоциации некоторых молекул* или *вырыванию слабозакрепленных ионов* из узлов решетки ➡ электропр-ть растет.

Диэлектрические потери на медленные виды поляризации

проявляются в *полярных* диэлектриках и только в переменных электрических полях

Работа, синусоидального поля E на поляризацию единицы объема диэлектрика за один период определяется интегралом по замкнутому контуру $P(E)$ и равна площади петли $P(E)$:

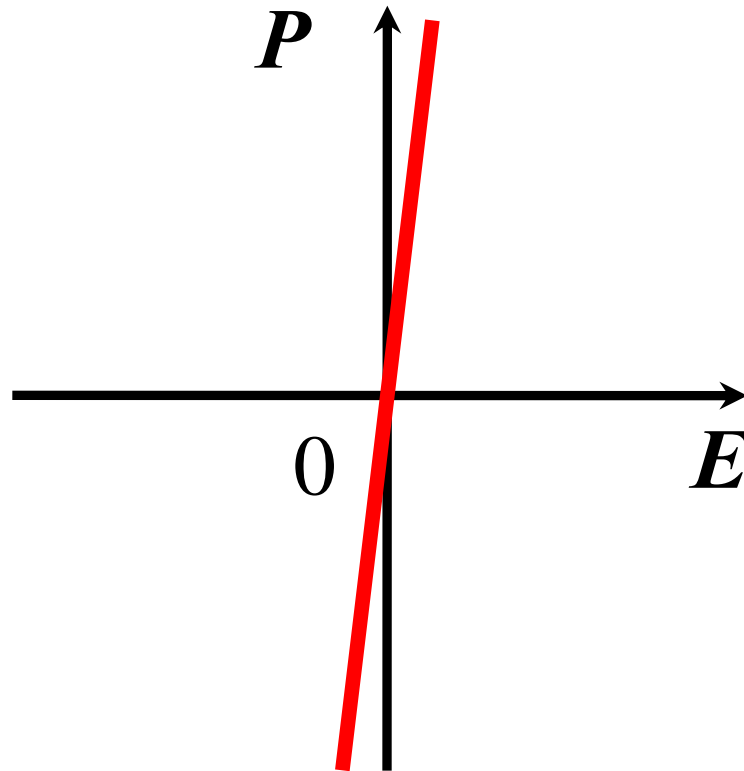
$$\omega = \oint P dE$$

В *неполярных* диэлектриках (*собственный электр. момент p равен 0*) нет медленных видов поляризации.

Если $\tau \ll 1/f$

(*область очень низких частот поля*),

То P успеваает следовать за E , и $\oint P dE = 0$.



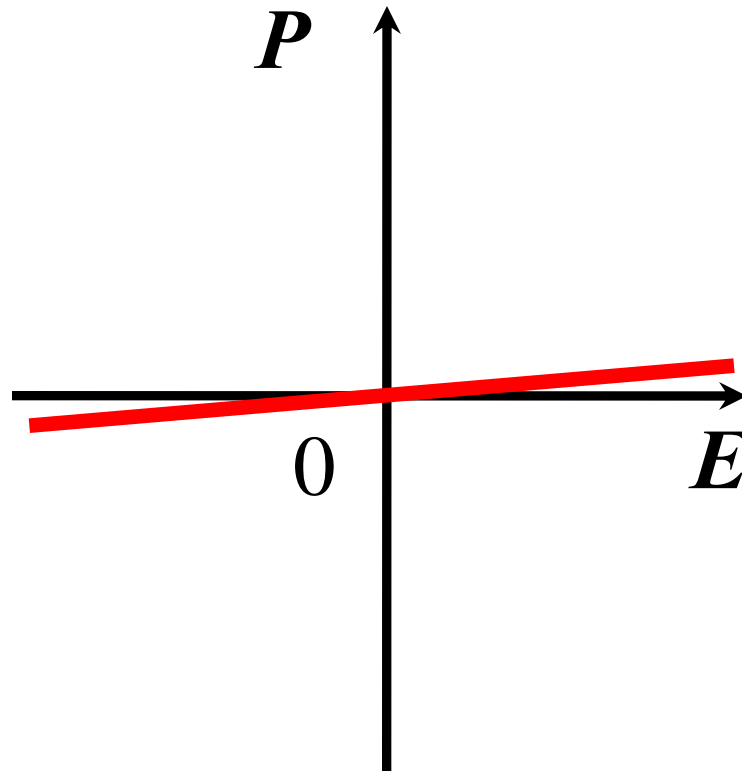
$\tau \ll 1/f$

Если $\tau \gg 1/f$,

(*область очень высоких частот поля*), то поляризация не успевает установиться

за полупериод изменения E ,

$$P=0 \text{ и } \oint P dE=0.$$



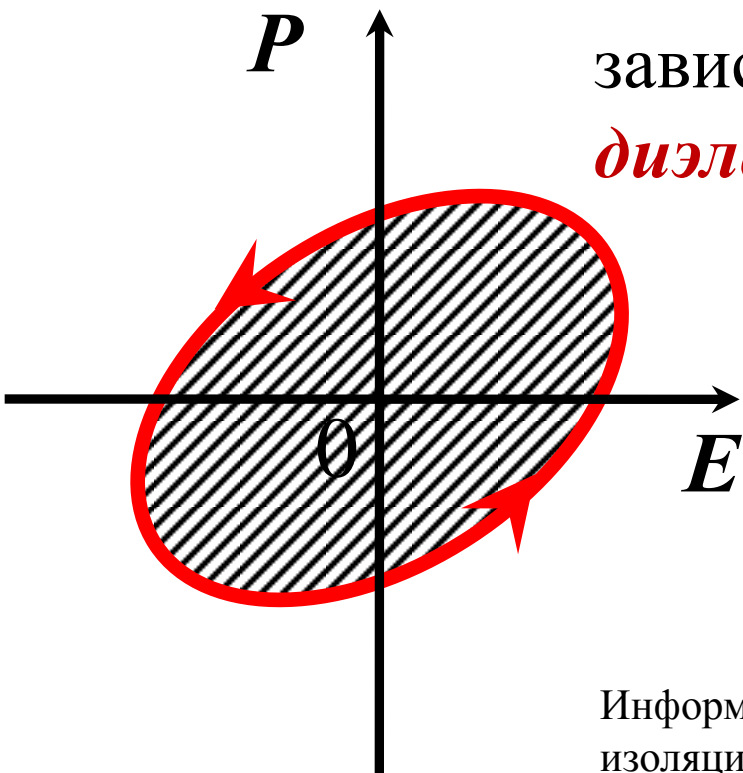
$$\tau \gg 1/f$$

Если $\tau \approx 1/f$,

то P отстает по фазе от E , и $\oint P dE > 0$.

На поляризацию затрачивается энергия поля E , переходящая в диэлектрические потери.

В области частот $f \approx 1/\tau$ наблюдается зависимость ϵ от частоты, называемая *диэлектрической дисперсией*.

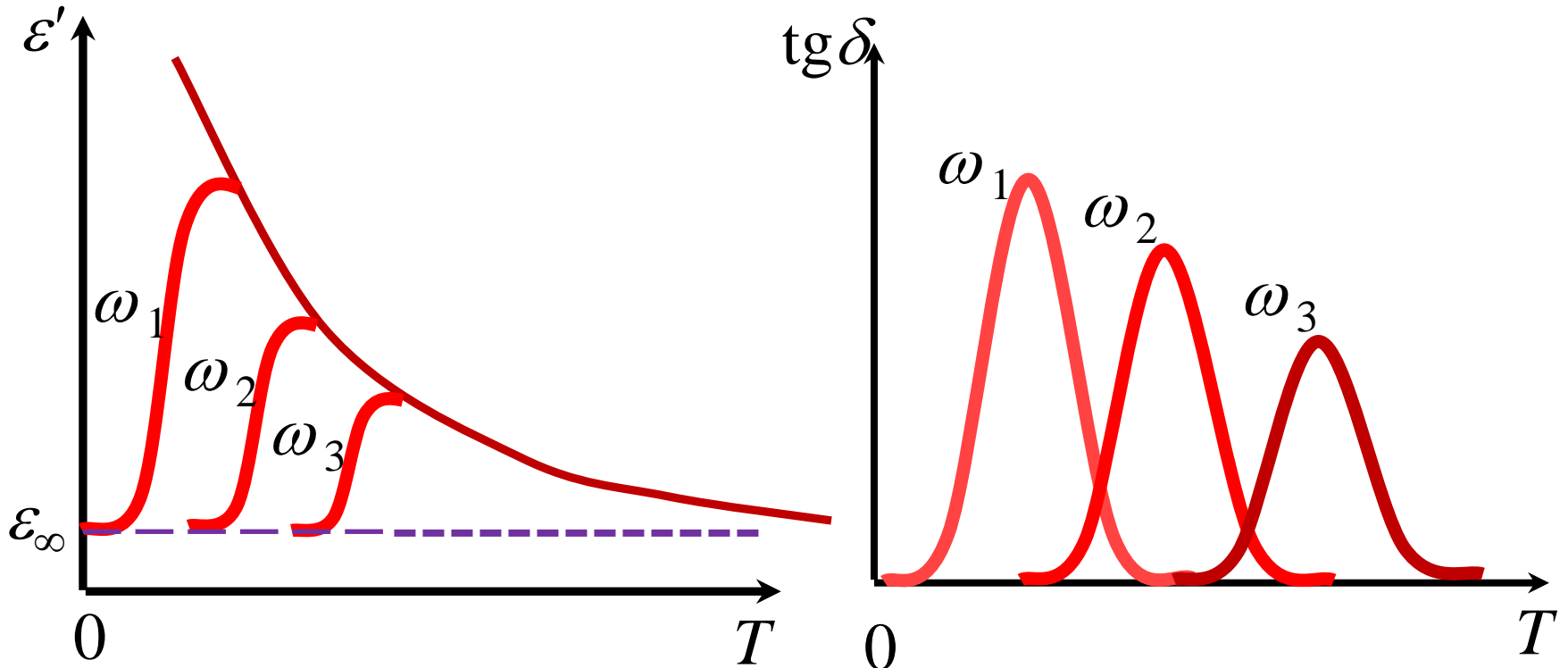


Условие максимума потерь: $\tau \approx 1/f$

Информация важна для специалистов, работающих с изоляционными системами.

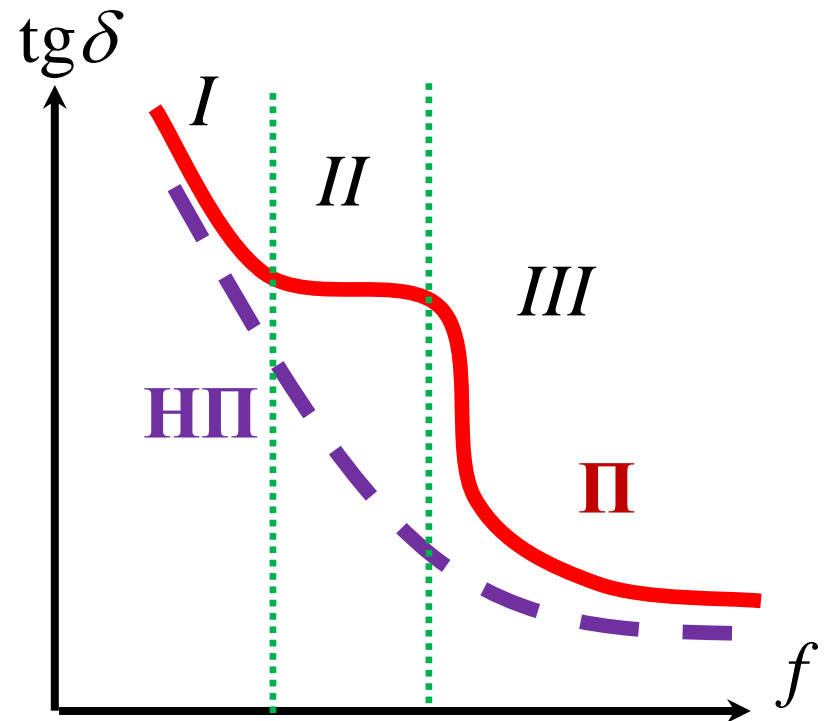
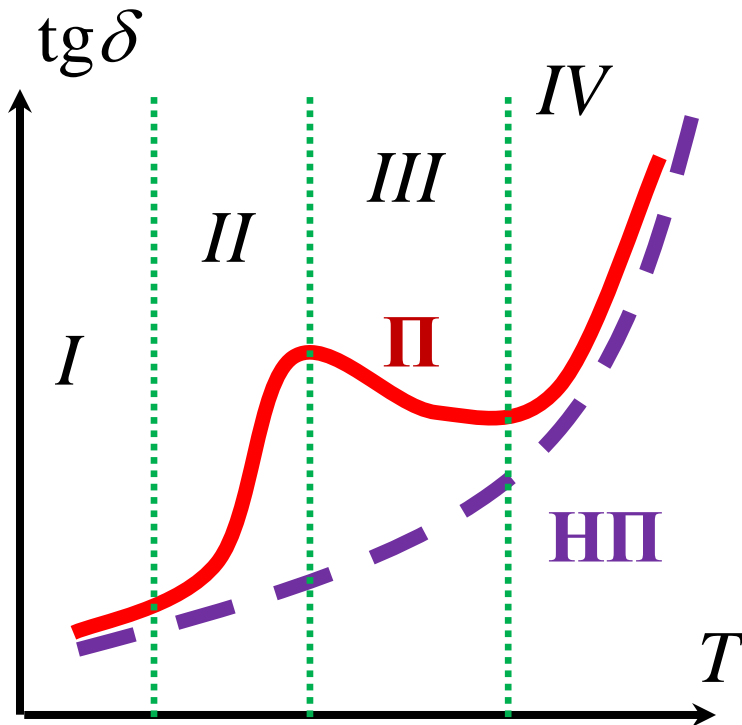
Время установления τ релаксационных видов поляризации уменьшается с ростом температуры \Rightarrow с ростом T максимум диэлектрической дисперсии смещается в область более высоких частот электрического поля.

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$$



Диэлектрические потери в **полярных** диэлектриках складываются из потерь на **электропроводность** и **релаксационных потерь**.

Зависимости $\text{tg}\delta$ от T и f для полярного (II) и неполярного (НII) жидкого диэлектрика:



Зависимость $\text{tg}\delta$ от T

I область – у II и III диэл-в $\text{tg}\delta$ *увеличивается*, т.к. *велики силы межмолекулярного взаимодействия, не достаточно тепловой эн-и*, чтобы молекулы успевали ориентир. вслед за полем; ТОЛЬКО Эл. поляризация.

II область – у II диэл-ка, кроме Эл. поляризации, еще релаксацион. поляризации, $\text{tg}\delta$ *увеличивается сильнее*, силы еще высоки, тепловая эн-я не так высока, Эл. полю необходимо затратить *больше энергии*, чтобы молекулы сориентир. вслед за полем.

Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от T

III область – $\operatorname{tg}\delta$ *уменьшается*, т.к. *не велики силы межмолекулярного взаимодействия*, **достаточно** *тепловой эн-и*, чтобы молекулы успевали ориентир. вслед за полем; частота колебаний молекул совпадает с частотой поля.

IV область – область высоких T , только эл. *поляризация*, т.к. резко *возрастает активная составляющ. тока I_a* , Π диэл-к приближается к Π диэл-ку.

Зависимость $\text{tg}\delta$ от f

I область – $\text{tg}\delta$ *уменьшается*, т.к. за полупериод E все *молекулы успевают ориентироваться* вслед за полем, I_a *не меняется*, I_c *увеличивается* с ростом f .

II область – **II** молекула *не успевает ориентироваться* вслед за полем за полупериод E ; происходит запаздывание.

III область – **II** молекулы *не принимают участия* в поляризации, **II** диэл-к приближается к **III** диэл-ку.

Диэлектрические потери на неоднородность структуры

характерны для *композиционных*
диэлектриков и диэлектриков *с примесями*
(в том числе и проводящими)

гетинакс, текстолит, слюдопласты, керамика,
компаунды, пропитанные материалы и т.д.

Миграционная поляризация обусловлена миграцией зарядов *в проводящих включениях* и их накоплением на *границах неоднородностей*. Время установления τ очень велико.

Для композиционных материалов, состоящих из хороших диэлектриков, частота релаксации $f_p < 1$ Гц и **миграционные потери** малы даже на промышленной частоте (50 Гц).

Если в диэлектрике есть проводящие включения, то f_p оказывается в области рабочих частот и **миграционные потери** необходимо учитывать.

Так, при увлажнении $\text{tg}\delta$ диэлектрика **возрастает**, так как **проводимость** воды велика.

Время релаксации – промежуток времени, в течение которого поляризованность диэл-ка после снятия поля уменьшается вследствие теплового движения молекул в ϵ раз от первоначального значения.

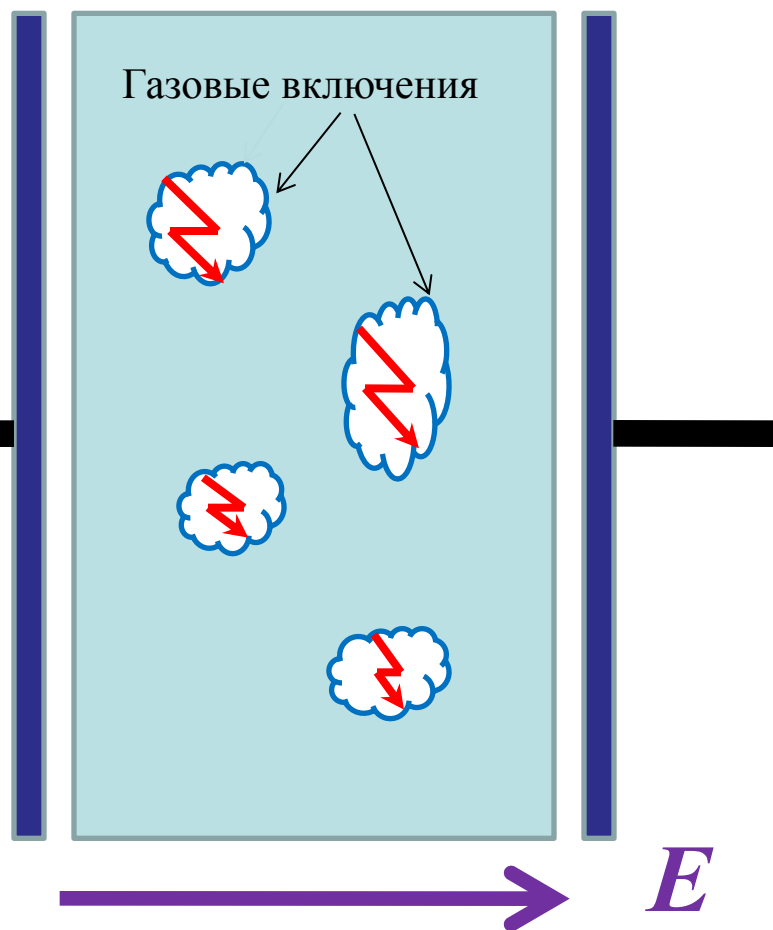
В случае *миграционной поляризации*, как и дипольной, возникает **интервал времен τ релаксации**, что приводит к *увеличению* частотного интервала миграционных потерь.

Причина: *неодинаковые свойства* основной среды и проводящих включений диэлектрика, *неодинаковая форма и ориентация включений*.

С ростом T удельная проводимость γ **растет экспоненциально**, поэтому частота релаксации и максимума *миграционных потерь* **повышается с ростом температуры**.

Ионизационные диэлектрические потери

в пористых диэлектриках при повышении напряжения сверх порога ионизации $U_{\text{ион}}$



Ионизационные потери:

$$P_{\text{ион}} = Af(U - U_{\text{ион}})^3,$$

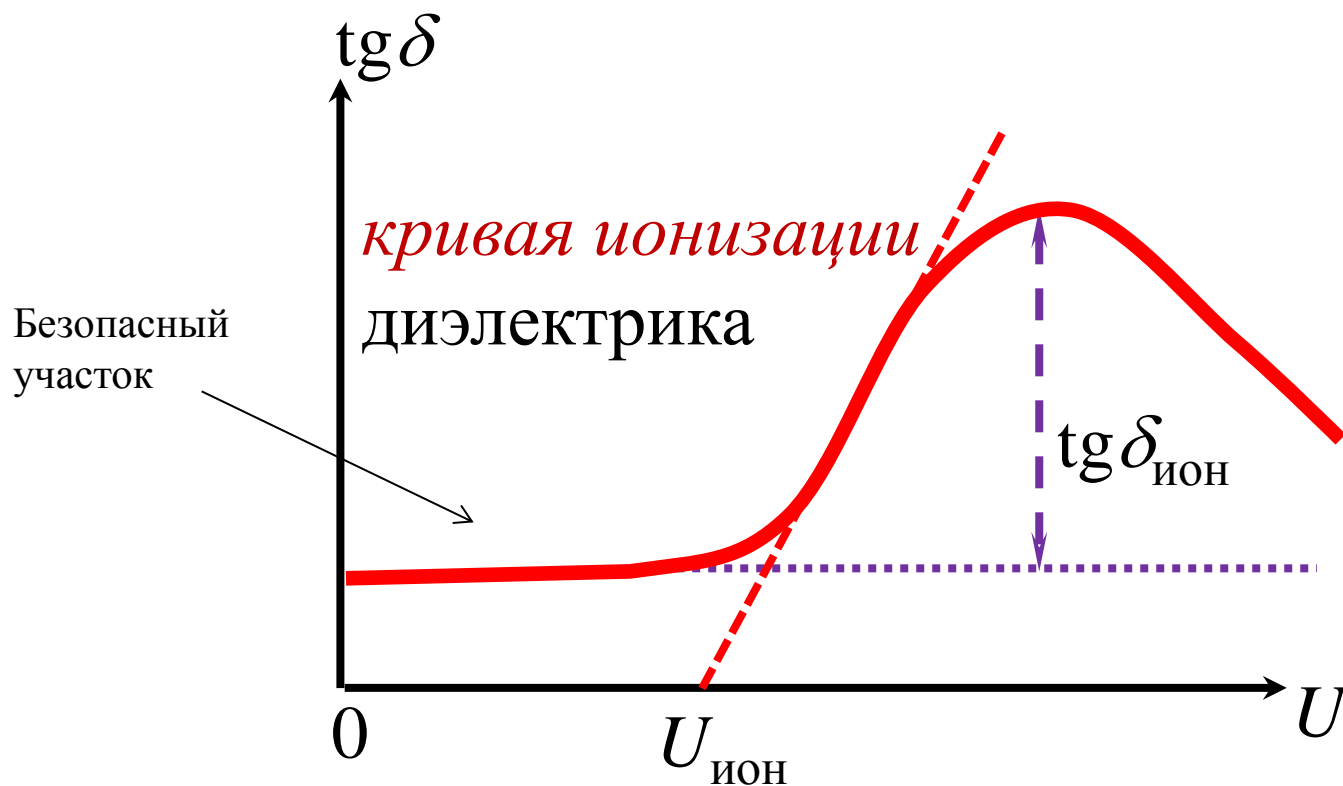
A – постоянная зависящая от свойств газа в порах;

f – частота приложенного электрического поля;

U – приложенное напряжение.

Диэл. прочность газа на много меньше, чем диэл-ка. В газ. промежутках происходит разряд, пробой.

Чем *меньше* приращение $\text{tg} \delta$ из-за ионизационных потерь ($\text{tg} \delta_{\text{ион}}$) и чем при *более высоких напряжениях* $U_{\text{ион}}$ начинается рост $\text{tg} \delta$, тем ***выше качество изоляции*** высокого напряжения.



Если *напр-е начала ионизации* $U_{\text{ион}}$ приблизит. $= U_{\text{раб}}$, изоляция состарилась, нужен осмотр, ремонт.

В *кабельных ЛЭП* проводят испытание систем для анализа $U_{\text{ион}}$.

Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от U

- важна для эл/техников, энергетиков:

- для изготовления эл/техн. устройств – ЭМ, трансформаторы, дроссели и т.д.;
- для оценки их работоспособности (выделяются газовые продукты в объеме диэл-ка).

В ТПУ НИИ высоких напряжений – изготавливают **изоляторы** (изоляция из ПЭ), которые должны выдерживать напряжение >500 кВ (1 млн. В):

- если $U_{\text{ион}} > 1$ млн. В – хорошо;
- если $U_{\text{ион}} < 1$ млн. В – плохо, пригодно для более низкого $U_{\text{раб}}$.

Резонансные диэлектрические потери

Наблюдаются *во всех* диэлектриках.

Происходят при *дисперсии* резонансного характера, когда *частота электрического поля* приближается к *частотам собственных колебаний* электронов или ионов.

Резонансные потери **электронной**
поляризации имеют максимумы в ***оптическом***
диапазоне: инфракрасной, видимой и
ультрафиолетовой областях спектра (**на**
частотах 10^{14} – 10^{17} Гц).

С ними связано поглощение света веществом.

Потери сопровождаются частотной
зависимостью показателя преломления и
максимальны в области т.н. «аномальной»
дисперсии, где ε снижается с ростом ω .

Максимумы ***резонансных потерь*** **ионной** поляризации наблюдаются в ***инфракрасном диапазоне*** на частотах 10^{13} – 10^{14} Гц.

В веществах с высокой ε , а также в стеклах и ситаллах, где есть слабо связанные ионы, частоты **ионного резонанса** могут быть ниже ($\sim 10^{12}$ Гц).

В этом случае начало **резонансного максимума** потерь захватывает диапазон СВЧ (10^9 – 10^{10} Гц).

Полный диэлектрический спектр

$$\rho = \rho_{\text{СКВ}} + \rho_{\text{Д}} + \rho_{\text{ИОН}} + \rho_{\text{РЕЗ}} + \rho_{\text{МИГ}}$$

