



XV ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ», ПЕРМЬ, 2018-02-14

# Применение метода DFR

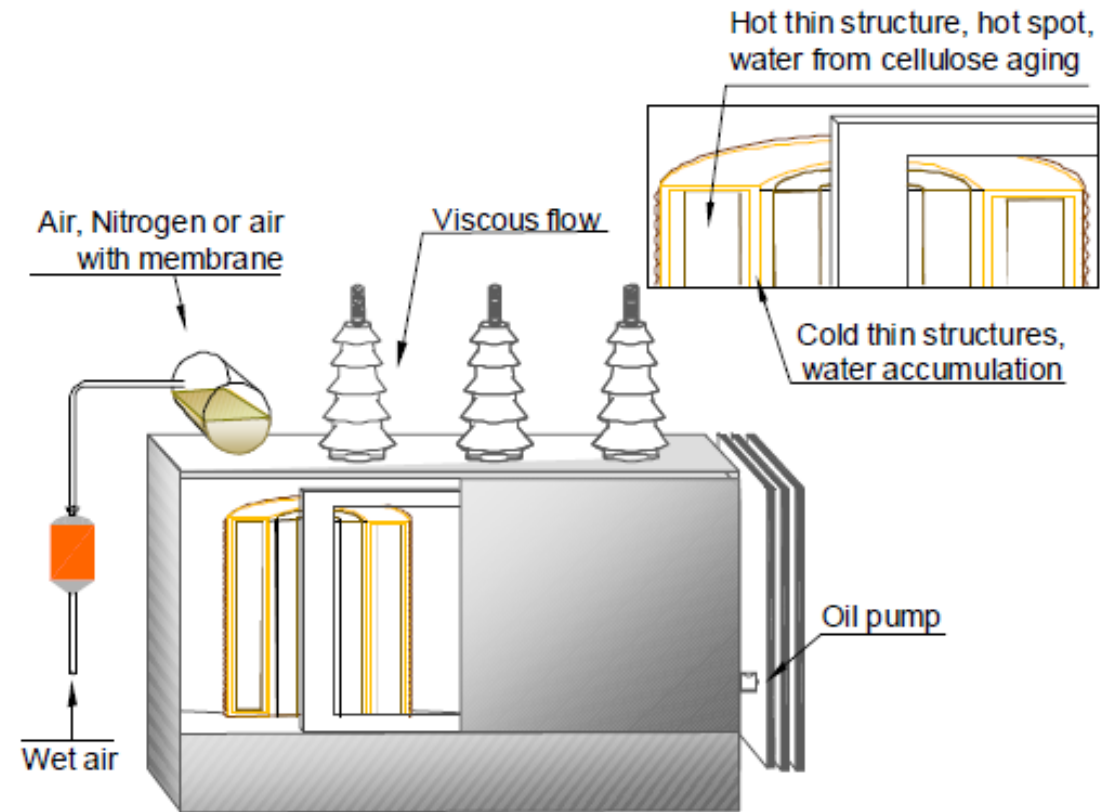
для оценки влажности твердой изоляции трансформаторов

Евгений Ермаков, ABB AB, отдел диагностики трансформаторов, г. Людвика, Швеция

# Влага в изоляции трансформатора

## Источники

- Остаточная влага (производство, ремонт)
- Атмосферная влага (система дыхания, уплотнения)
- Деструкция целлюлозы (термохимическое старение)



Source: CIGRE WG A2.30, Brochure 349 "Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems", June 2008

# Распределение влаги

Целлюлоза - масло

3% влаги в 2,5 тоннах  
целлюлозной изоляции  
= 75 кг



20 ppm влаги  
(0,002%) = 0,5 кг

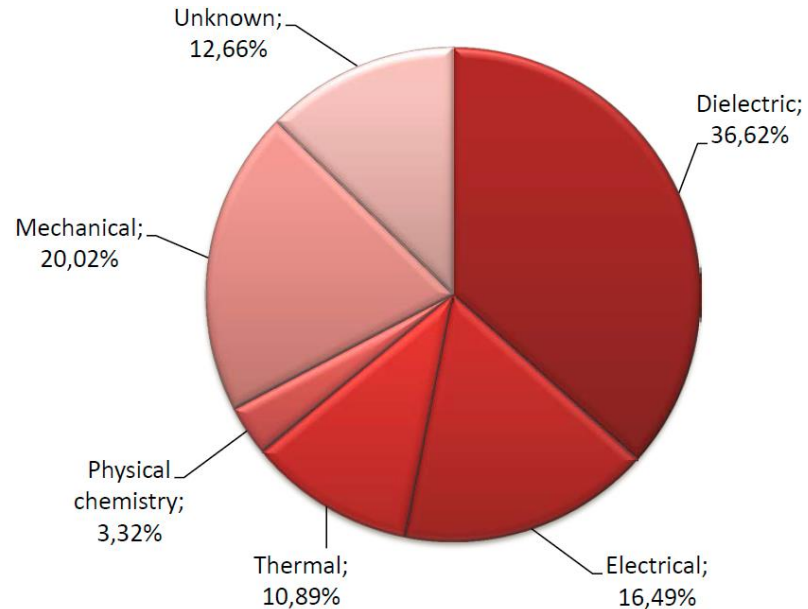
25 тонн масла



# Влага в изоляции трансформатора

## Проблемы

- Ухудшение диэлектрических характеристик
- Катализатор деструктивных химических процессов



Source: CIGRE WG A2.37, "Questionnaire "Transformer Reliability Survey", July 2015

349

MOISTURE EQUILIBRIUM AND MOISTURE MIGRATION  
WITHIN  
TRANSFORMER INSULATION SYSTEMS

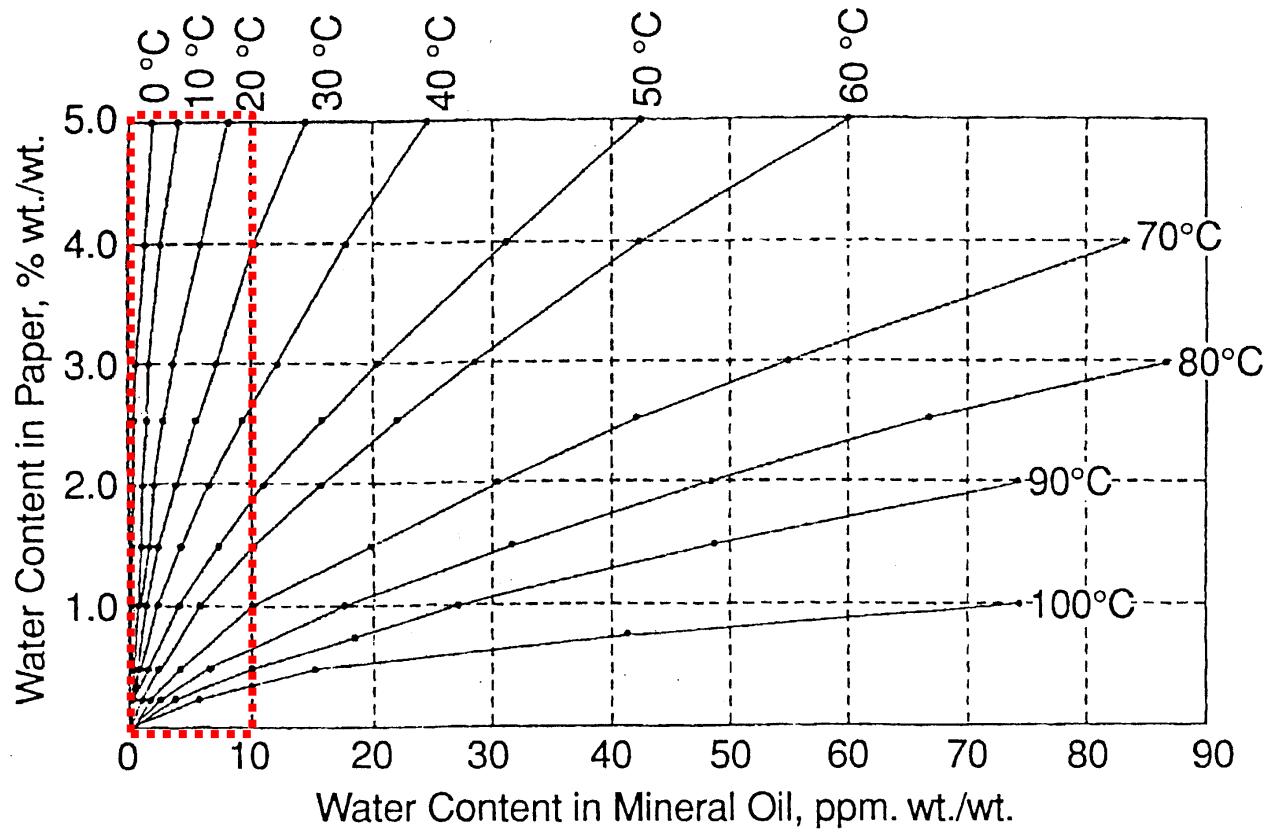
Working Group  
A2.30

June 2008

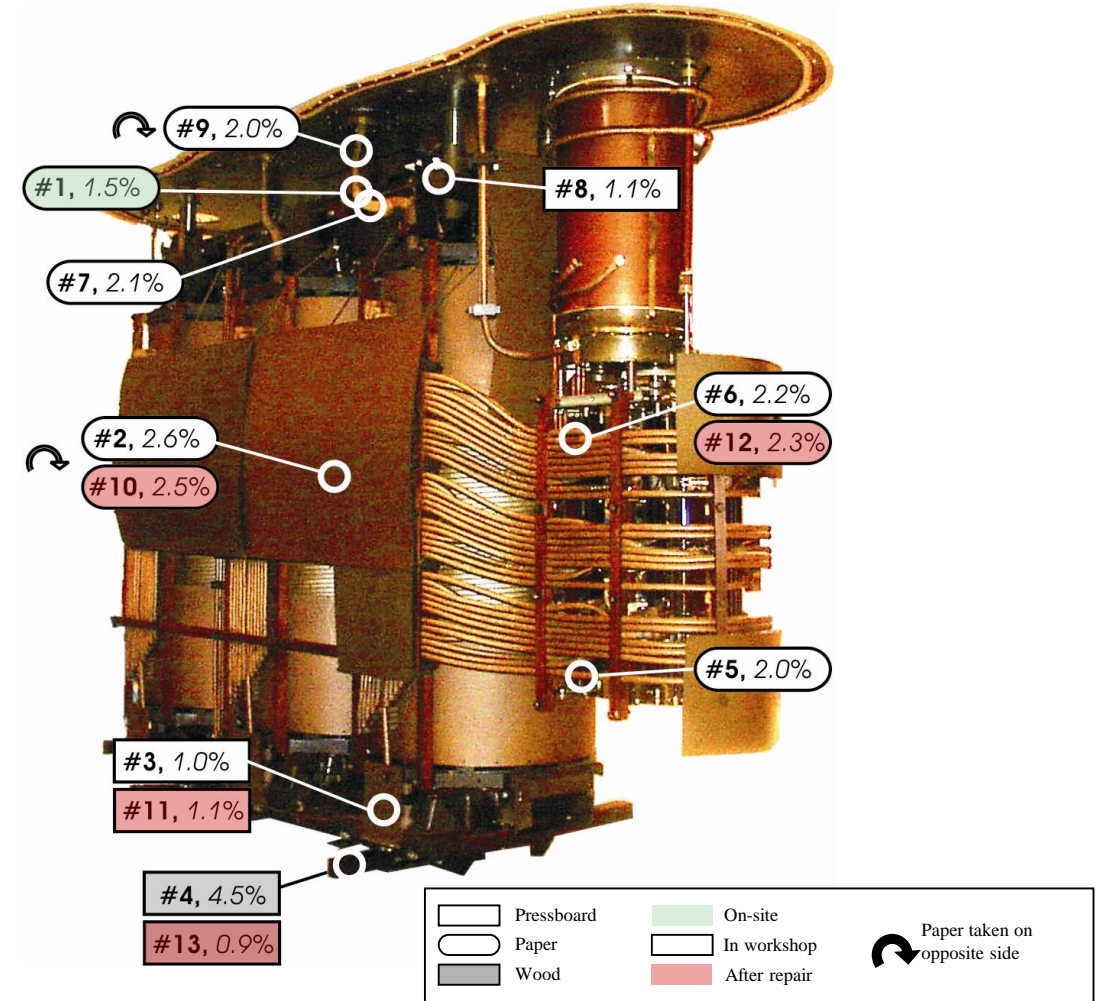


# Определение влажности твердой изоляции

## Традиционные методы



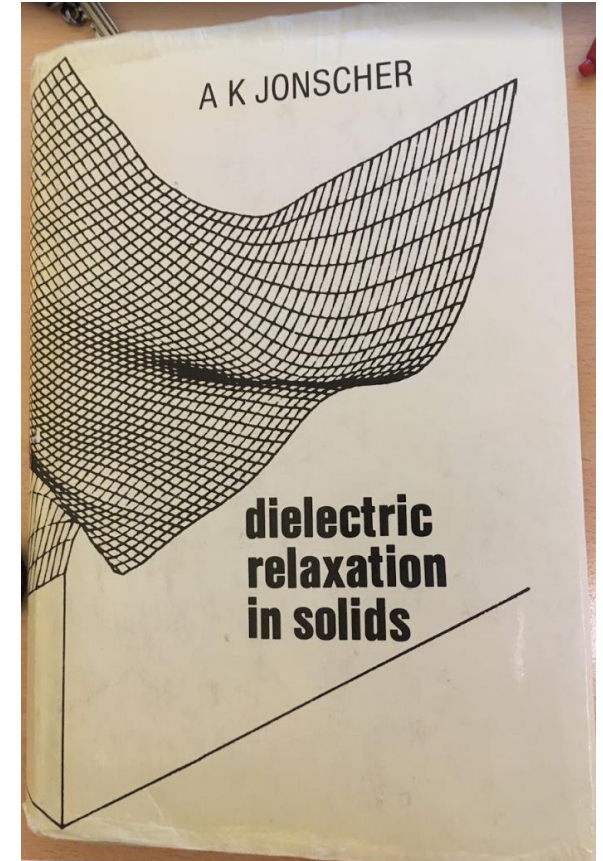
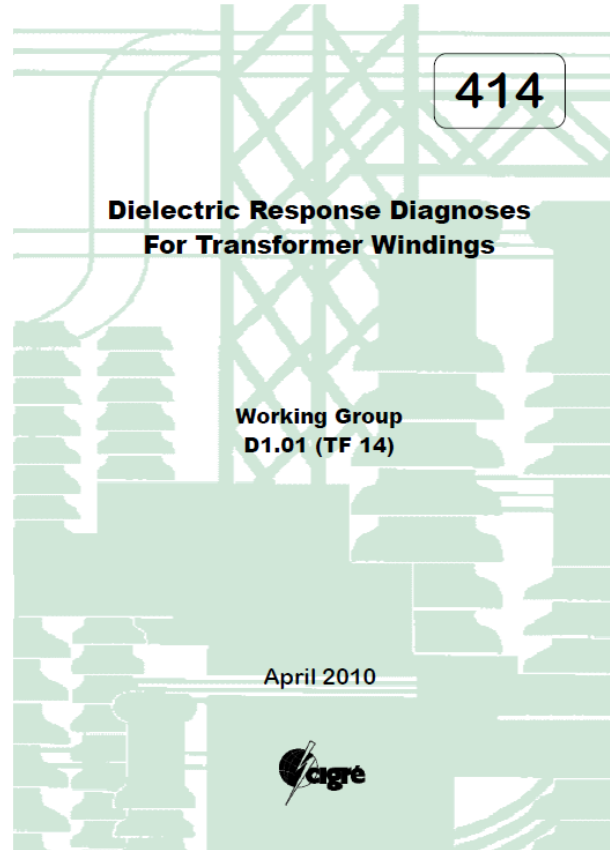
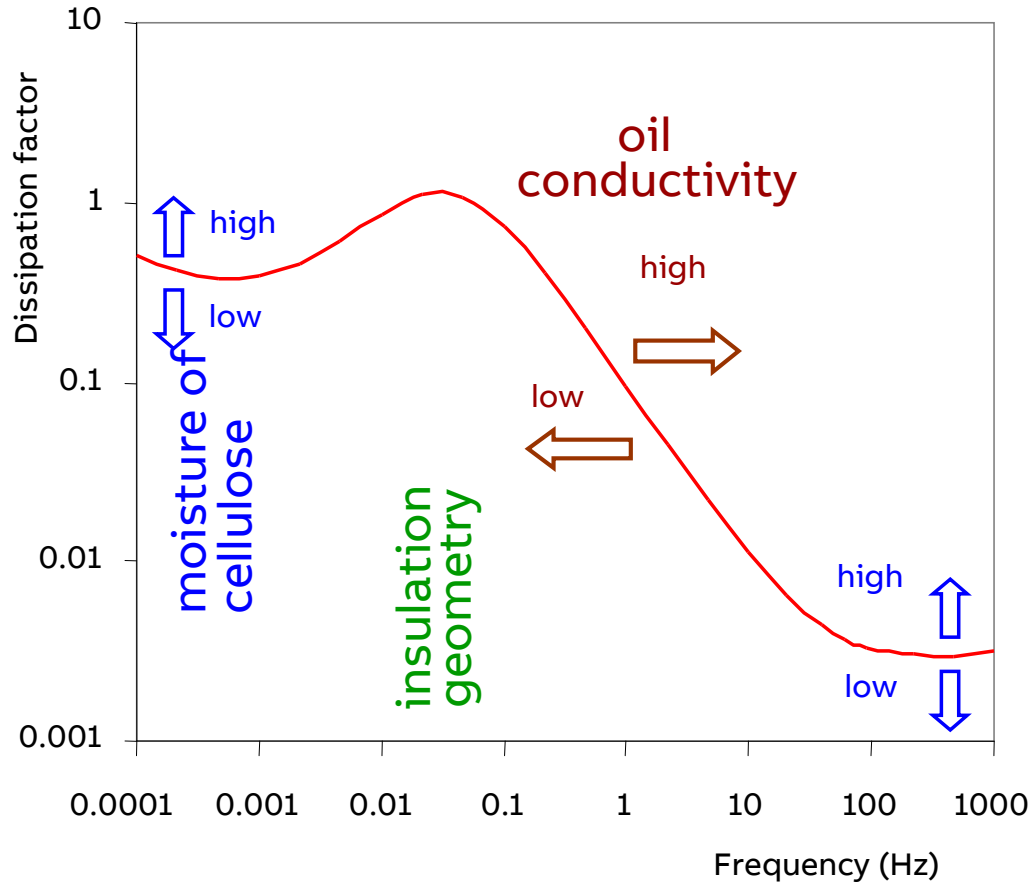
Source: P.J.Griffin, C. M. Bruce and J. D. Christie: "Comparison of Water Equilibrium in Silicone and Mineral Oil Transformers", Minutes of the Fifty-Fifty Annual Conference of Double Clients, Sec. 10-9.1, 1988



:: CIGRE WG D1.01, Brochure 414 " Dielectric Response Diagnoses For Transformer Windings", April 2010

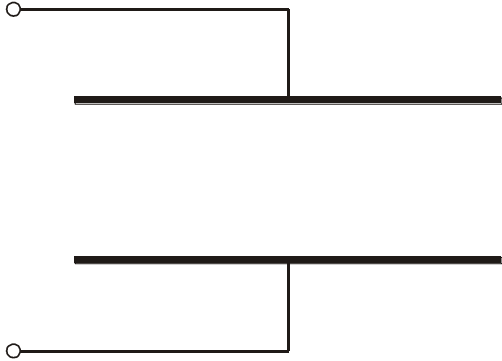
# Оценка влажности твердой изоляции

Частотный отклик DFR (FDS)

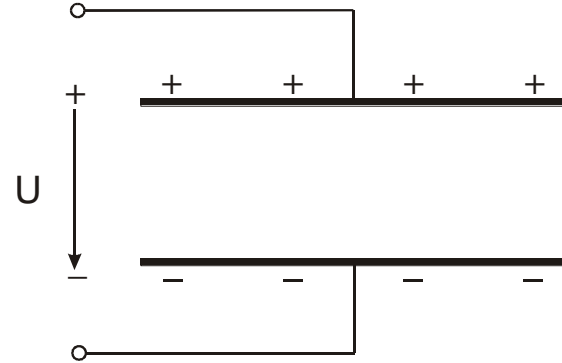
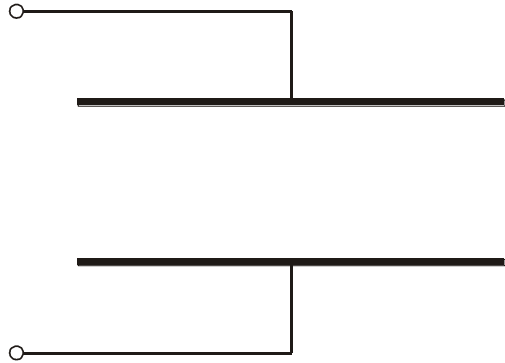


---

# Идеальный диэлектрик



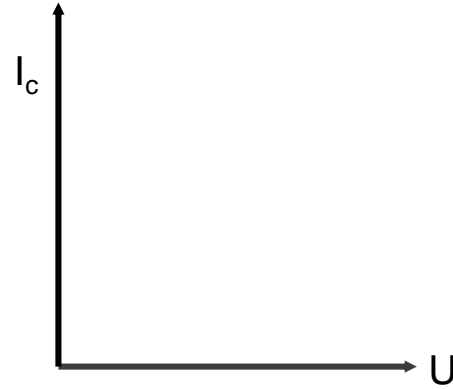
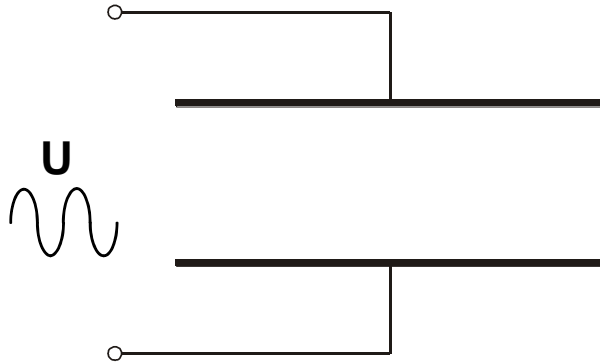
# Идеальный диэлектрик



$$Q = C_0 \cdot U = \frac{A}{d} \cdot \epsilon_0 \cdot U$$

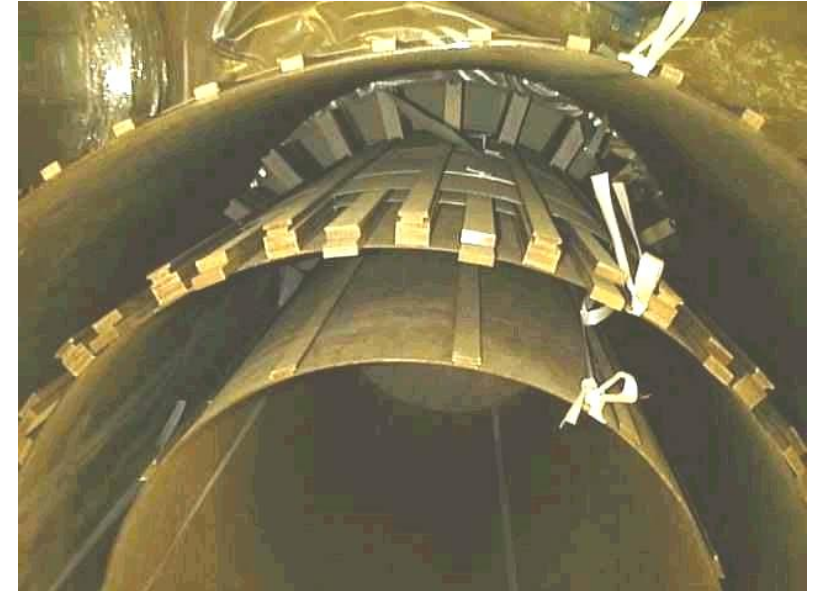
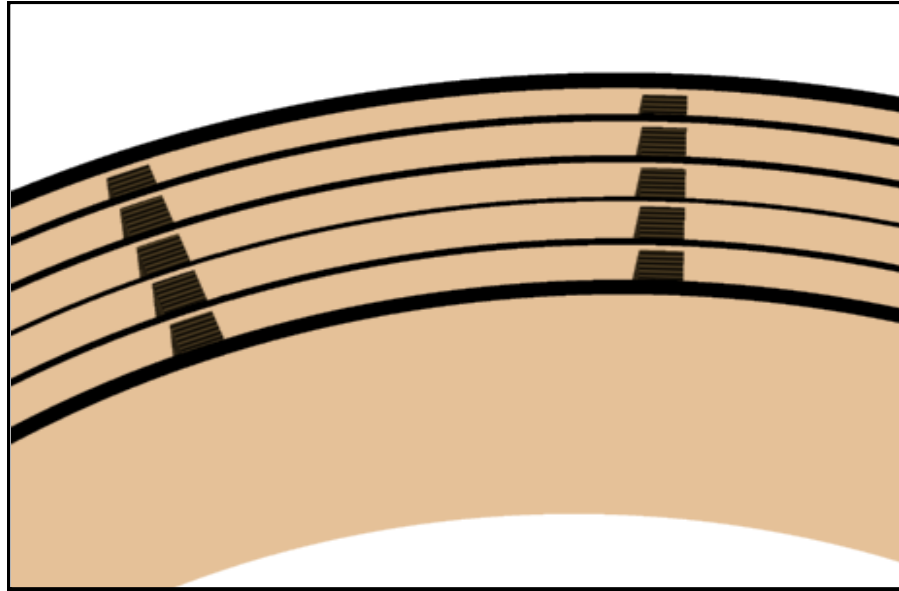
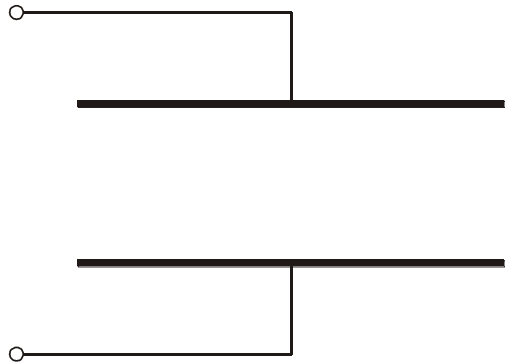


# Идеальный диэлектрик

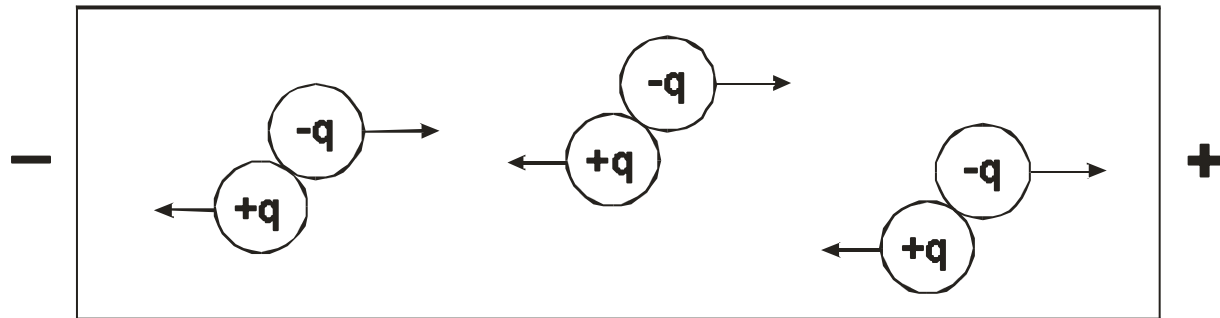
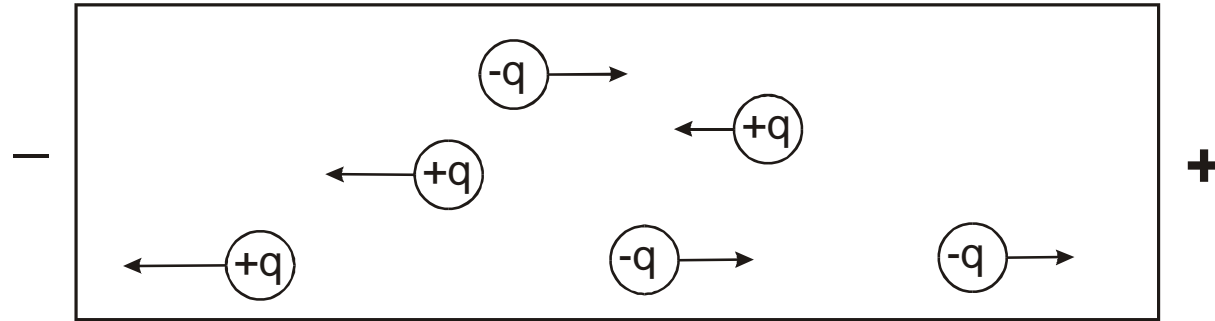


$$I(\omega) = j\omega C_0 U(\omega)$$

# Реальный диэлектрик



# Проводимость и поляризация

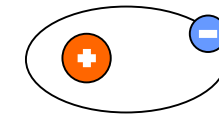
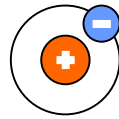


# Поляризация

Отсутствие  
внешнего поля

Внешнее поле

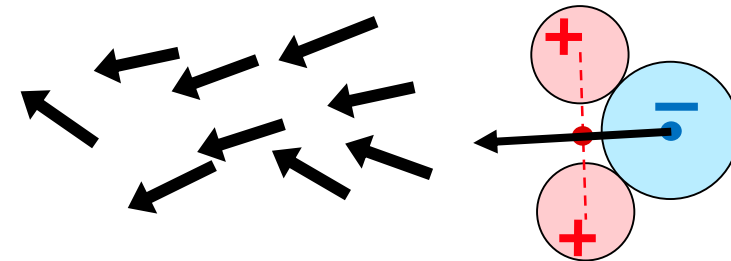
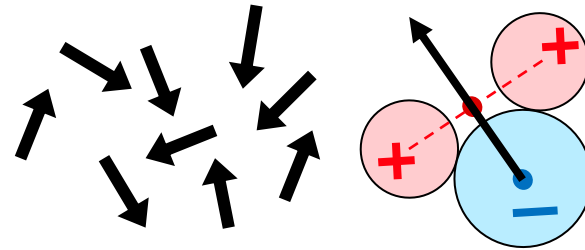
Электронная  
 $10^{11} < f < 10^{15}$  Hz



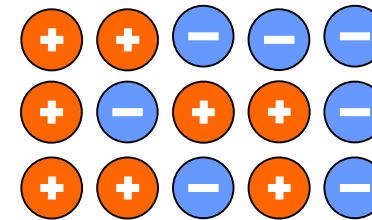
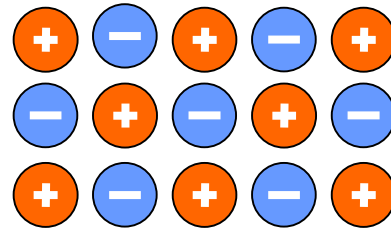
Атомная  
 $10^6 < f < 10^{11}$  Hz



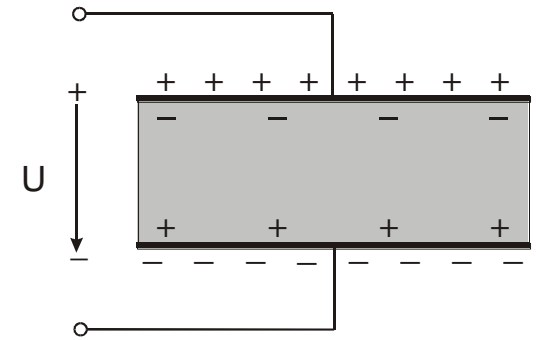
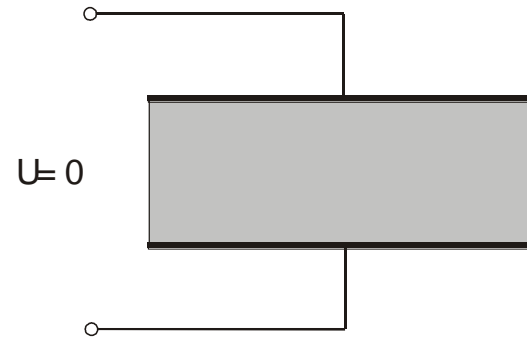
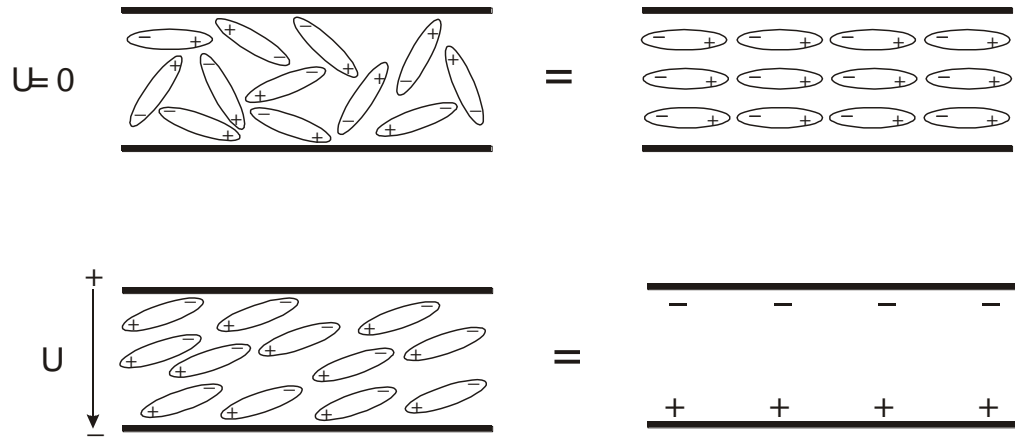
Дипольная  
(ориентационная)  
 $1 < f < 10^6$  Hz



Структурная  
 $10^{-6} < f < 1$  Hz



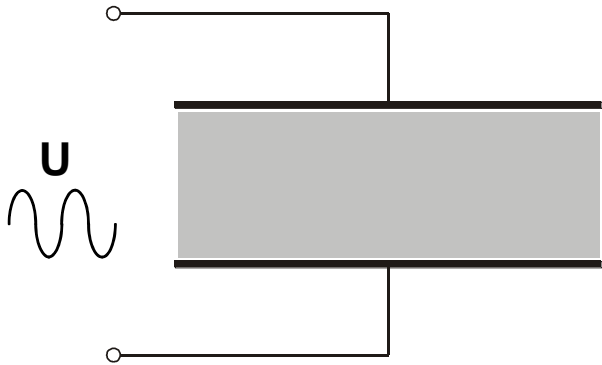
# Поляризация



$$Q = \epsilon_r \cdot C_0 \cdot U = \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \cdot \epsilon_0 \cdot U$$

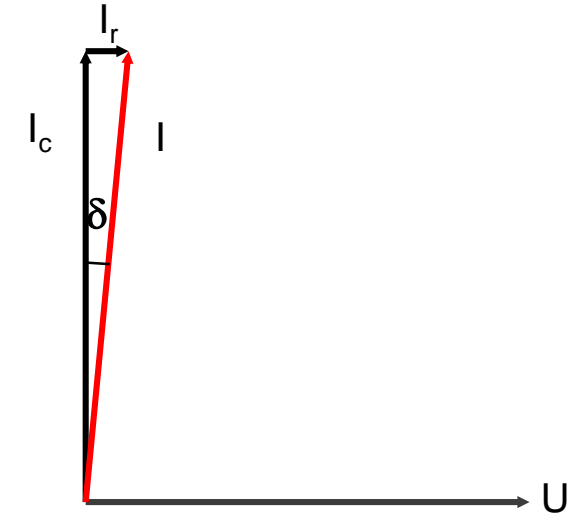
$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

## Частотный отклик диэлектрика



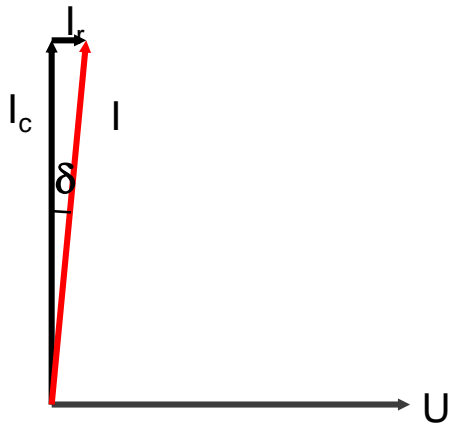
$$I(\omega) = j\omega \cdot \varepsilon_r(\omega) C_0 \cdot U(\omega)$$

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)$$



- Можно получить эталонные зависимости  $\varepsilon_r'(\omega)$  и  $\varepsilon_r''(\omega)$  для заранее известных состояний диэлектрика (база данных)
- Состояние изоляции определяется путем сопоставления измеренных  $\varepsilon_r'(\omega)$  и  $\varepsilon_r''(\omega)$  с результатами из базы данных

# Частотный отклик диэлектрика



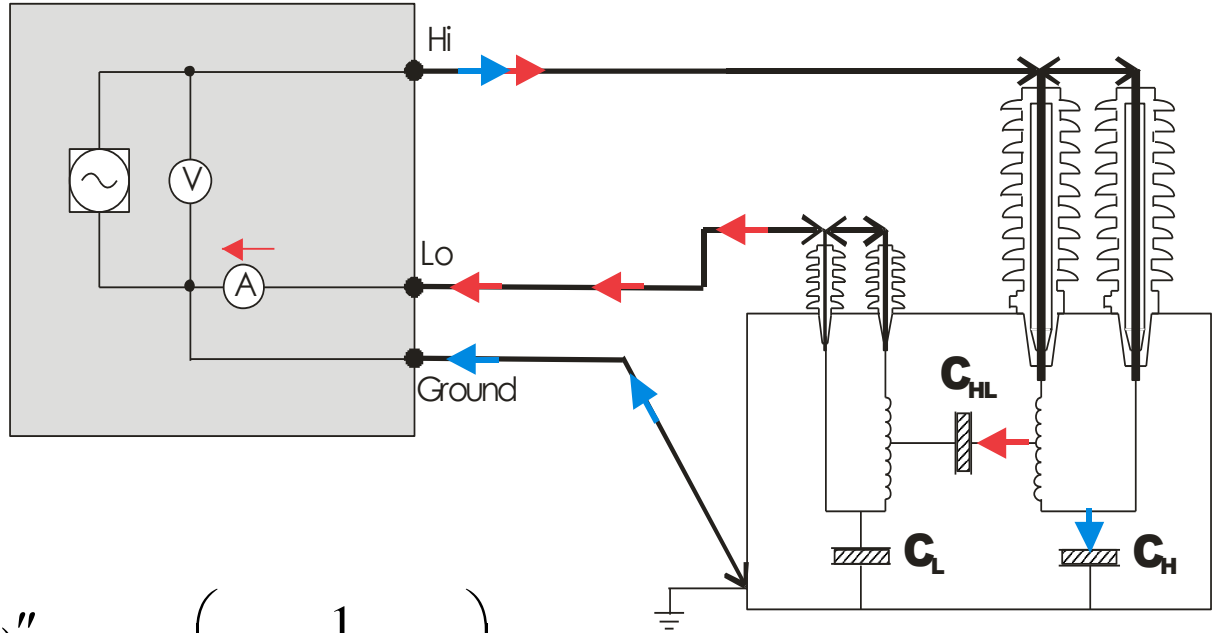
$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) = \frac{C(\omega)}{C_0}$$

$$\varepsilon_r(\omega) = \frac{1}{j\omega Z(\omega)C_0} \quad Z(\omega) = \frac{U(\omega)}{I(\omega)}$$

$$\varepsilon_r(\omega)' = \operatorname{Re}\left(\frac{1}{j\omega Z(\omega)C_0}\right) \quad \varepsilon_r(\omega)'' = -\operatorname{Im}\left(\frac{1}{j\omega Z(\omega)C_0}\right)$$

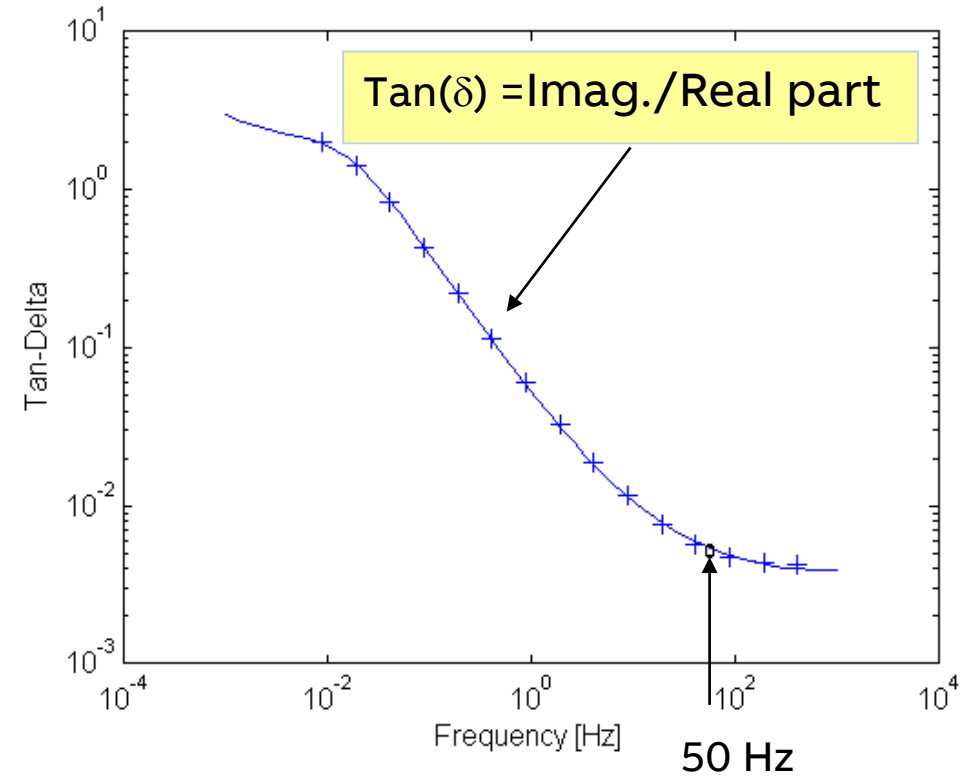
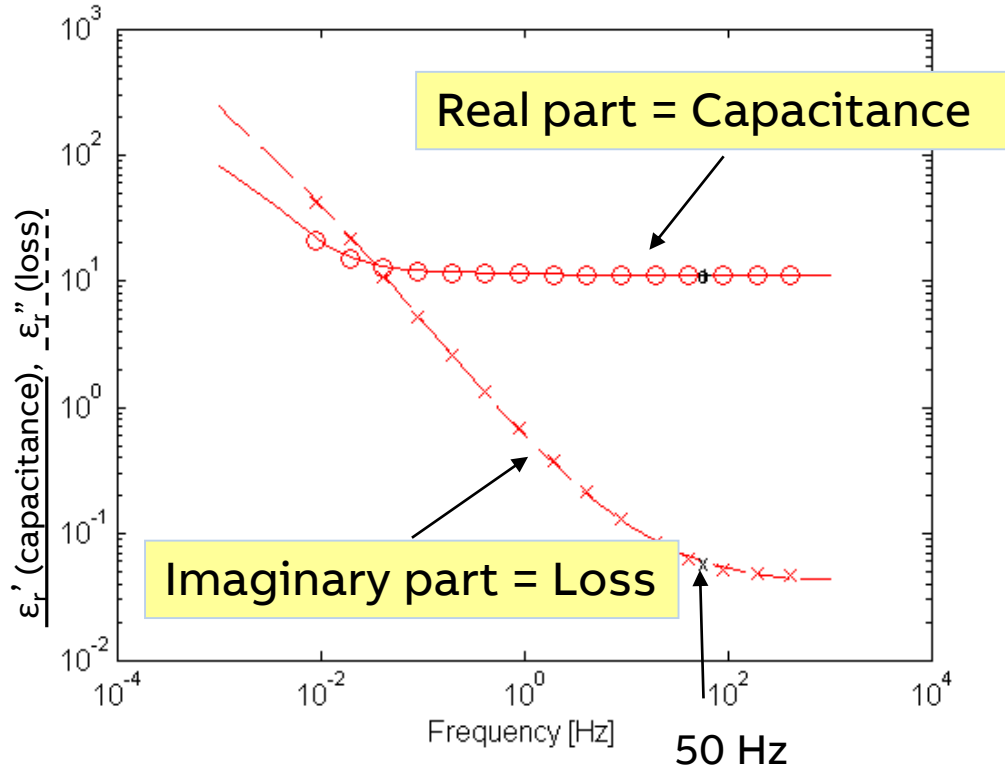
$$\tan\delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

$\varepsilon_r', \varepsilon_r''; \operatorname{tg}\delta; C', C'' \dots$



Picture source: Megger

# Пример частотного отклика изоляции трансформатора





# Частотный отклик трансформатора

База данных

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)$$

- Эталонные зависимости  $\varepsilon_r'(\omega)$  и  $\varepsilon_r''(\omega)$  для заранее известных состояний масла
- Эталонные зависимости  $\varepsilon_r'(\omega)$  и  $\varepsilon_r''(\omega)$  для заранее известных состояний твердой изоляции
- Определить влияние каждой составляющей на итоговый частотный отклик

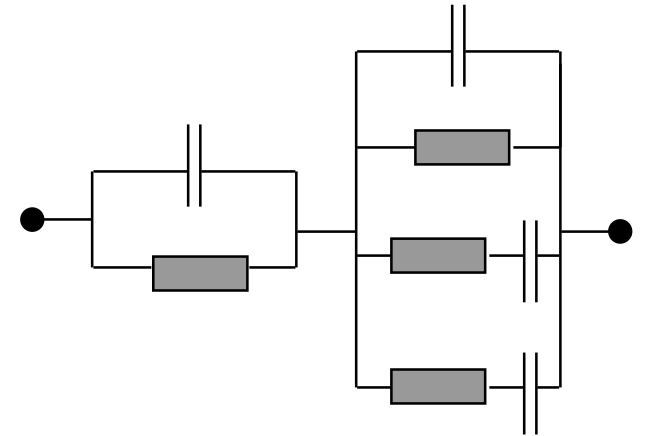
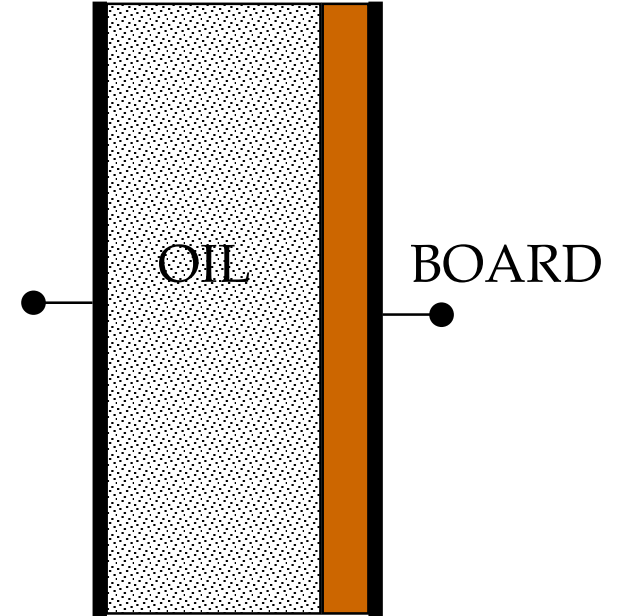
# Частотный отклик масла

Масло

- Неполярная жидкость:  $\epsilon_{r\text{ oil}} = 2.2$
- Проводимость:  $10^{-13} < \sigma < 10^{-10}$  S/m

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon'_r(\omega) - j\epsilon''_r(\omega)$$

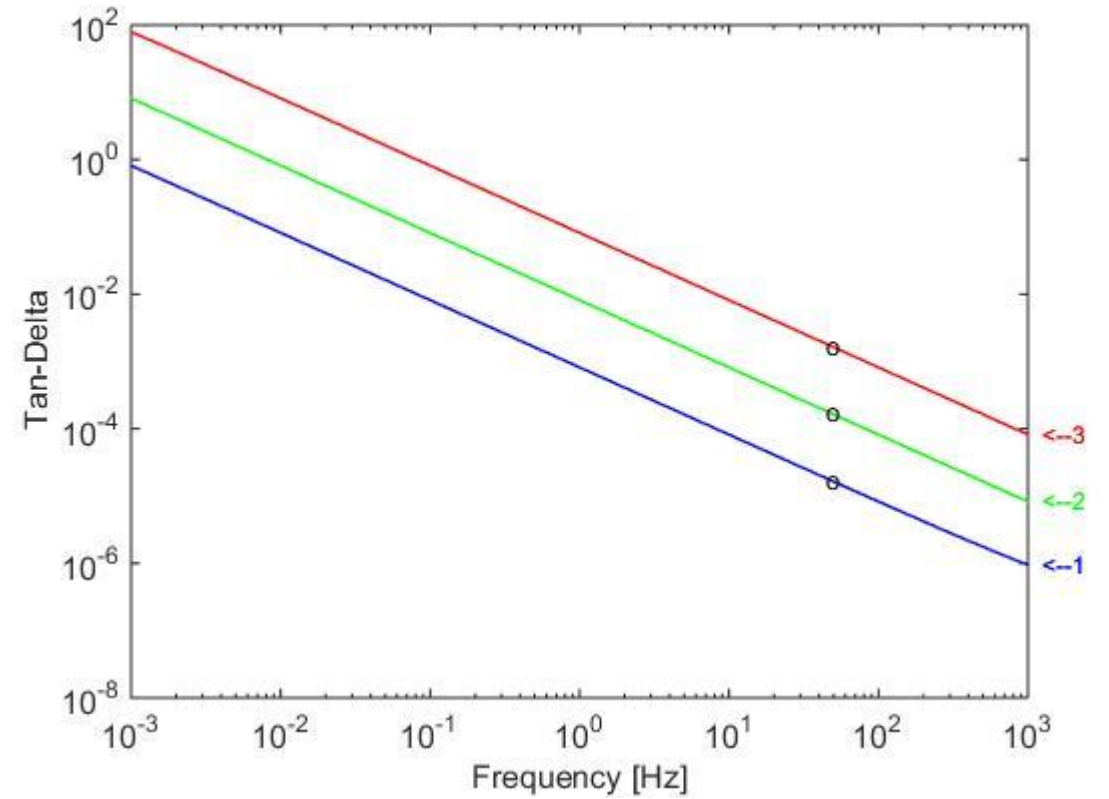
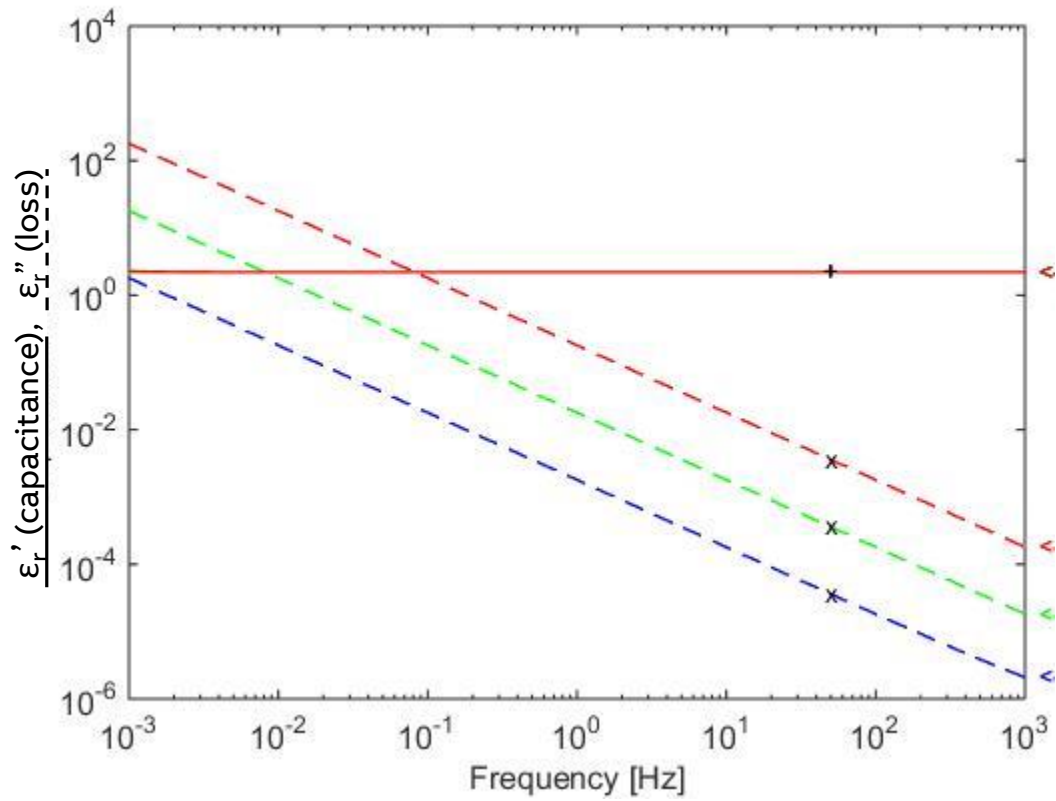
$$\epsilon_{r\text{ oil}} = 2,2 - j \frac{\sigma_{\text{oil}}}{\omega C_0}$$



# Частотный отклик масла

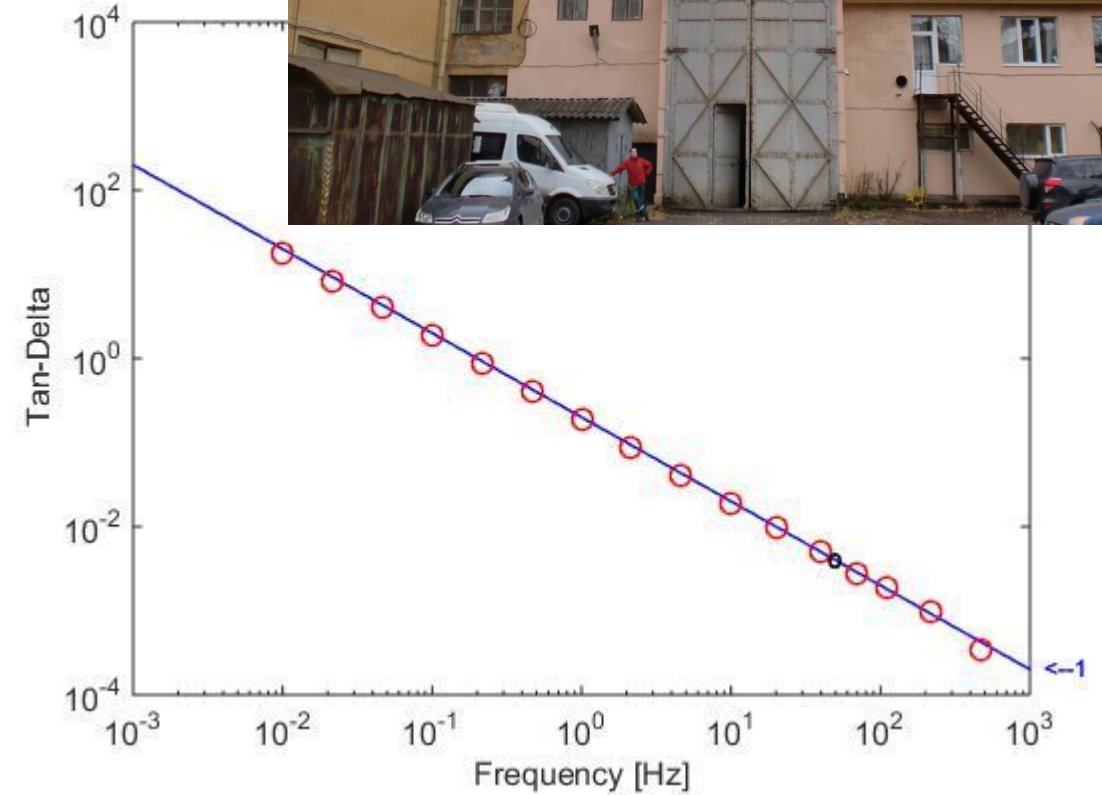
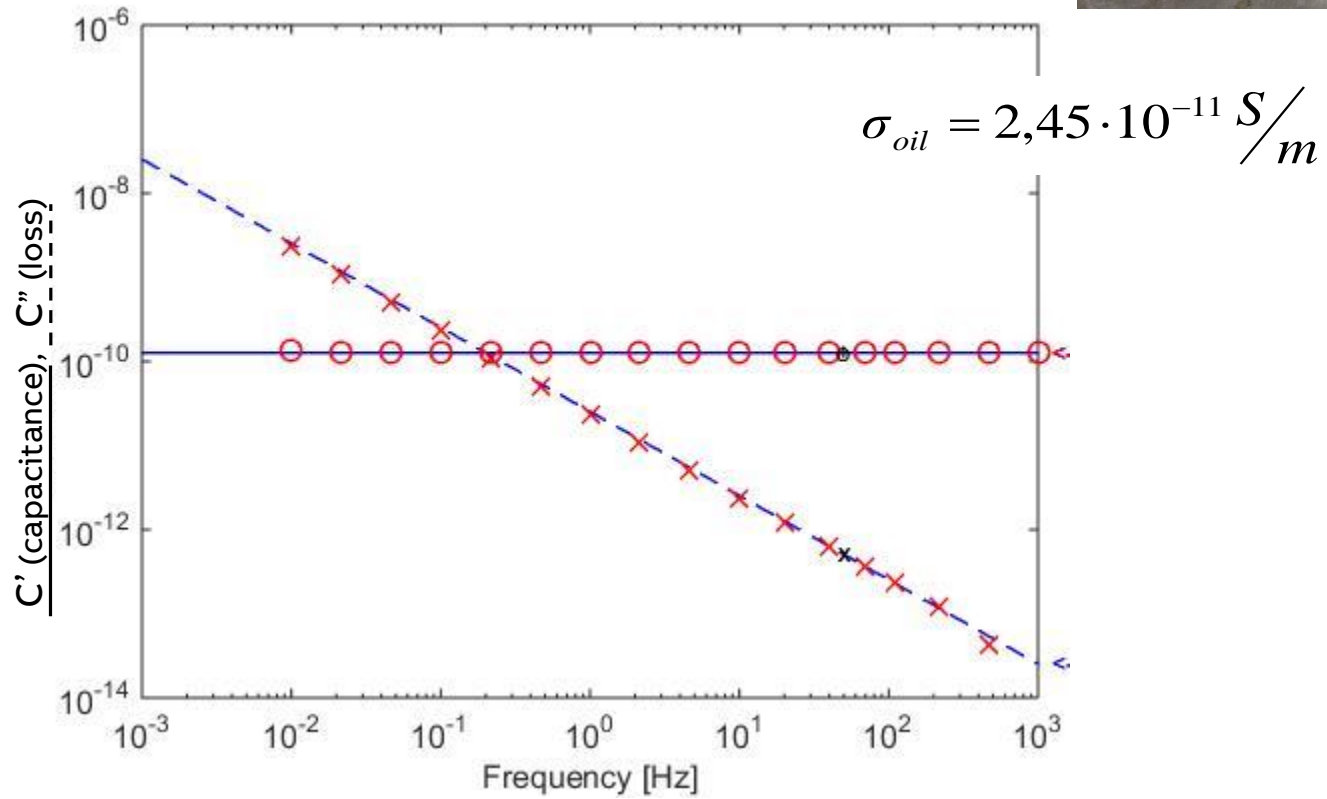
$$\varepsilon_{r oil} = 2,2 - j \frac{\sigma_{oil}}{\omega C_0}$$

—  $\sigma_{oil} = 10^{-11} S/m$   
—  $\sigma_{oil} = 10^{-12} S/m$   
—  $\sigma_{oil} = 10^{-13} S/m$



# Частотный отклик масла

Пример измерения



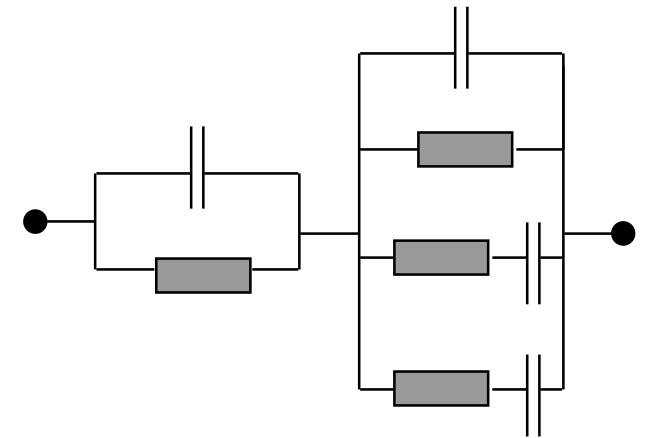
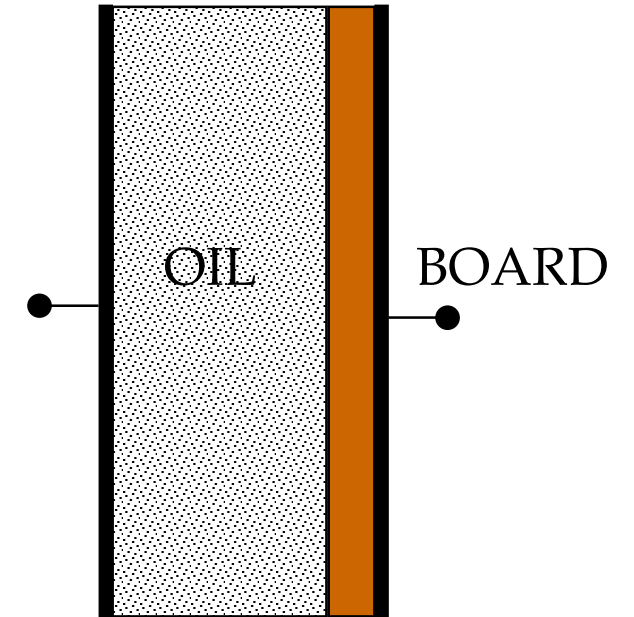
# Частотный отклик твердой изоляции

Электрокартон

- $\epsilon_{rPB} = 4.3 - 4.5$
- Проводимость:  $10^{-16} < \sigma < 10^{-12}$  S/m
- $\epsilon_{rPB}'(\omega)$  и  $\epsilon_{rPB}''(\omega)$  зависят от влагосодержания

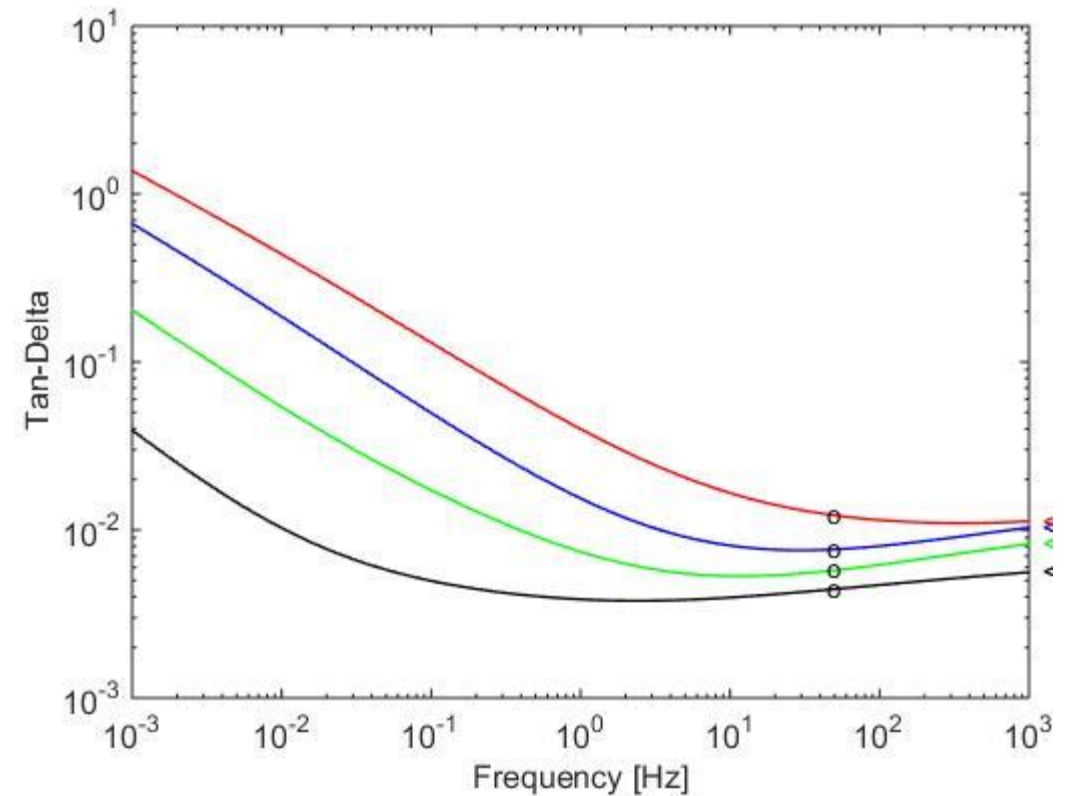
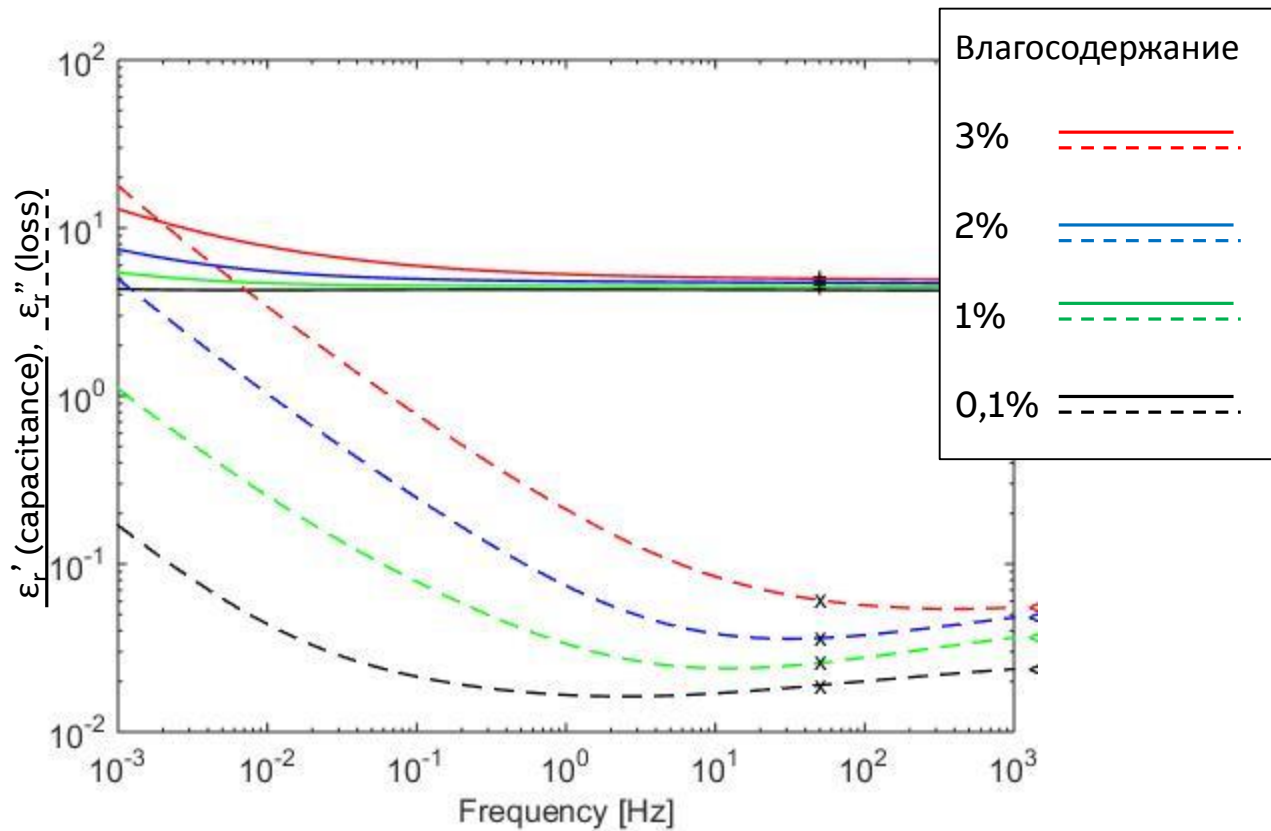
$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega)$$

$$\epsilon_{rPB}(\omega) = \epsilon_{rPB}'(\omega) - j\epsilon_{rPB}''(\omega)$$



# Частотный отклик твердой изоляции

Зависимость от влагосодержания

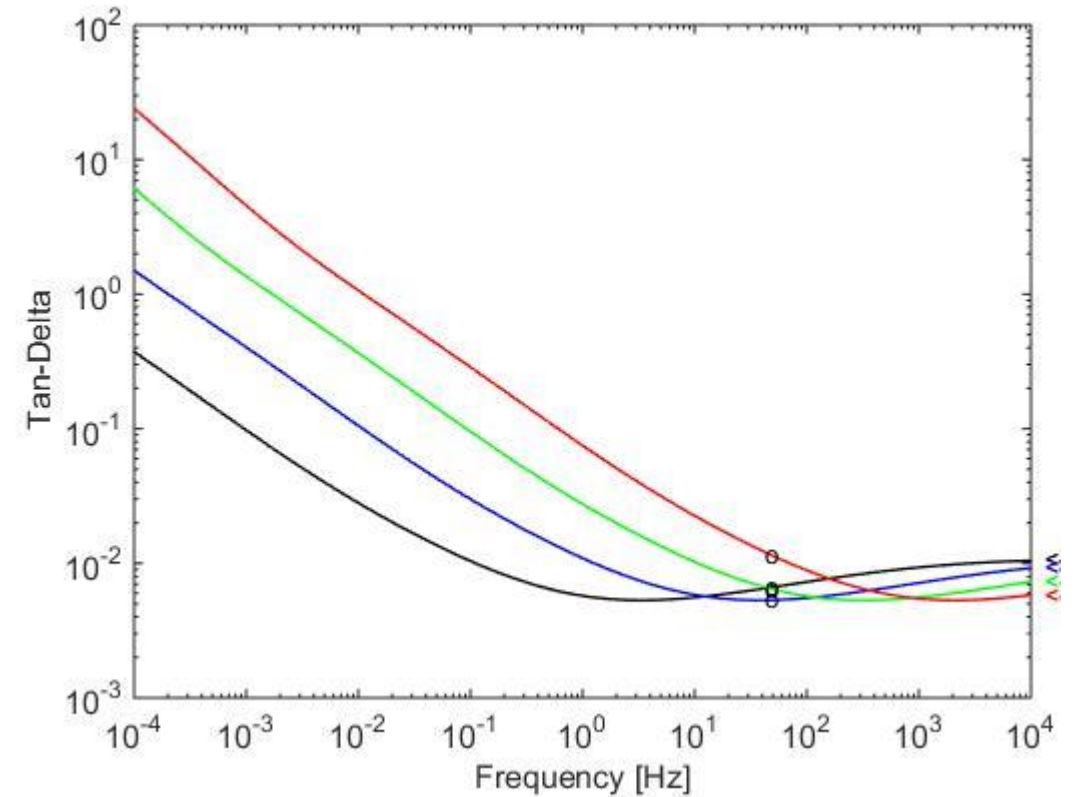
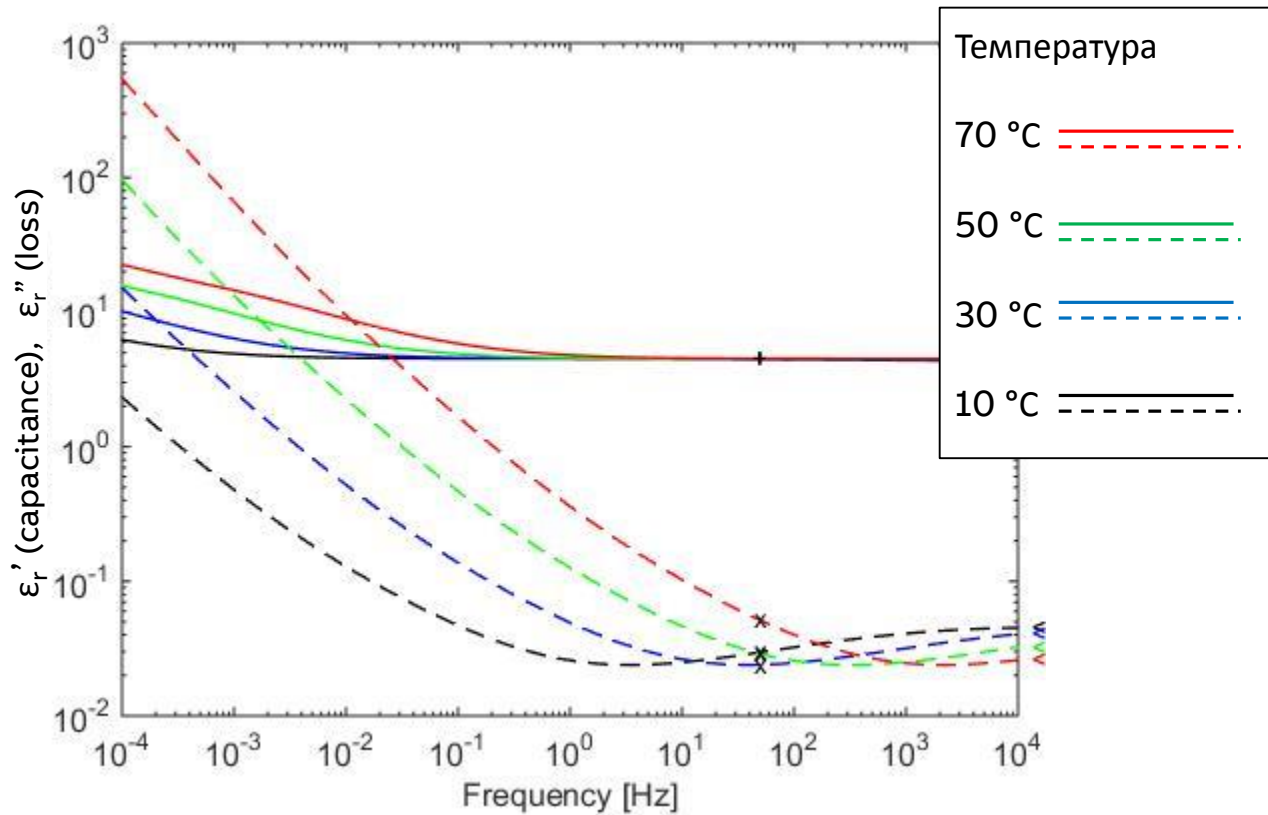


# Частотный отклик твердой изоляции

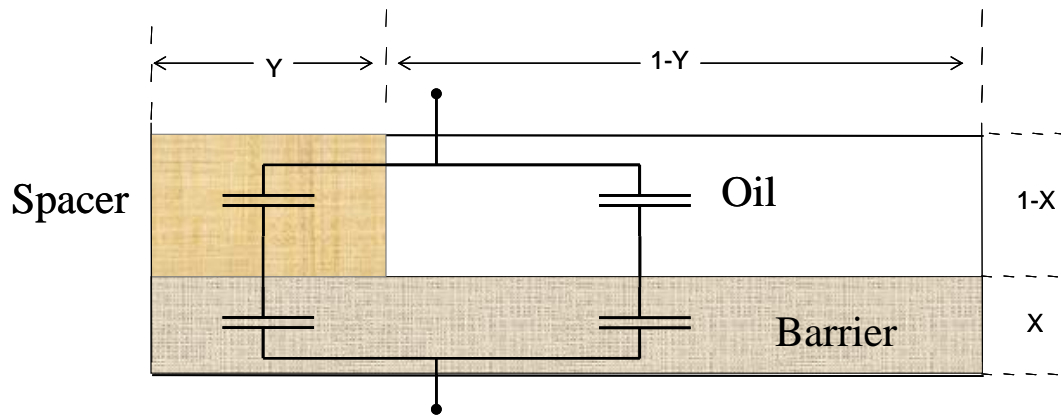
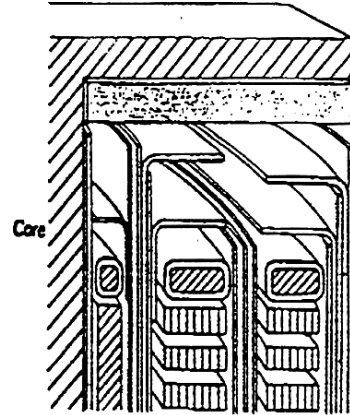
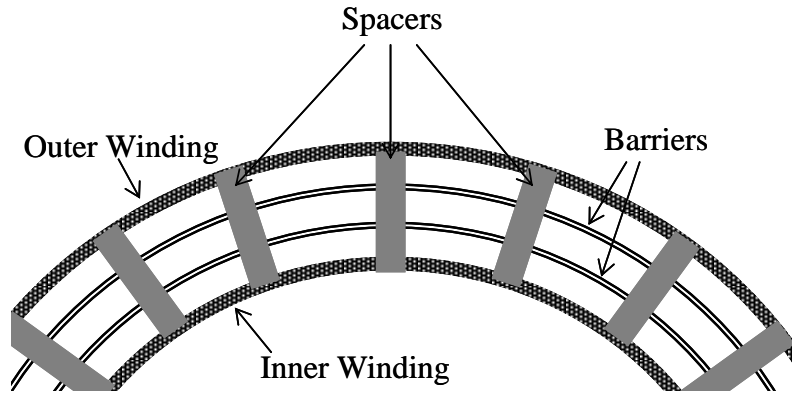
Температурная зависимость

$$\omega(T) = \omega(T_0) \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$E_A$  typically = 0,9 eV



# Моделирование частотного отклика



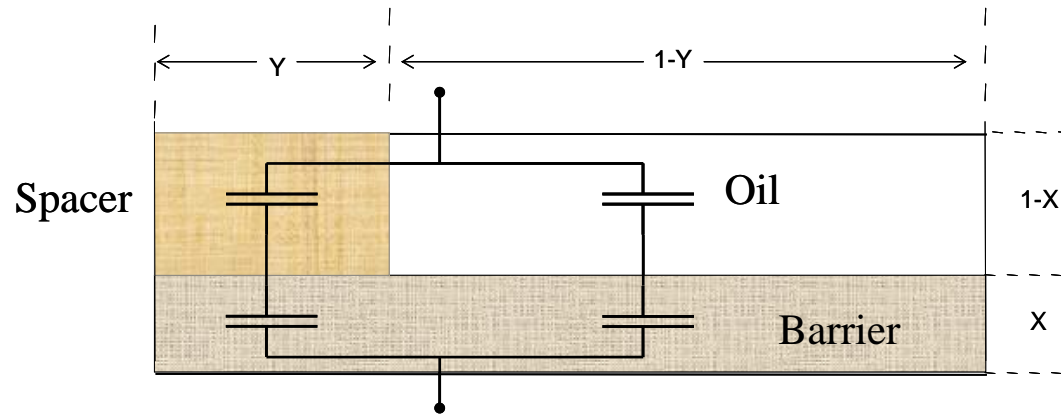
$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot 2\pi \cdot h}{\ln\left(\frac{r_{HV}}{r_{LV}}\right)}$$

### Typical values:

- X = % barriers in the main duct (15-55%)
- Y = % spacers of the circumference (15-25%)



# Моделирование изоляции трансформатора

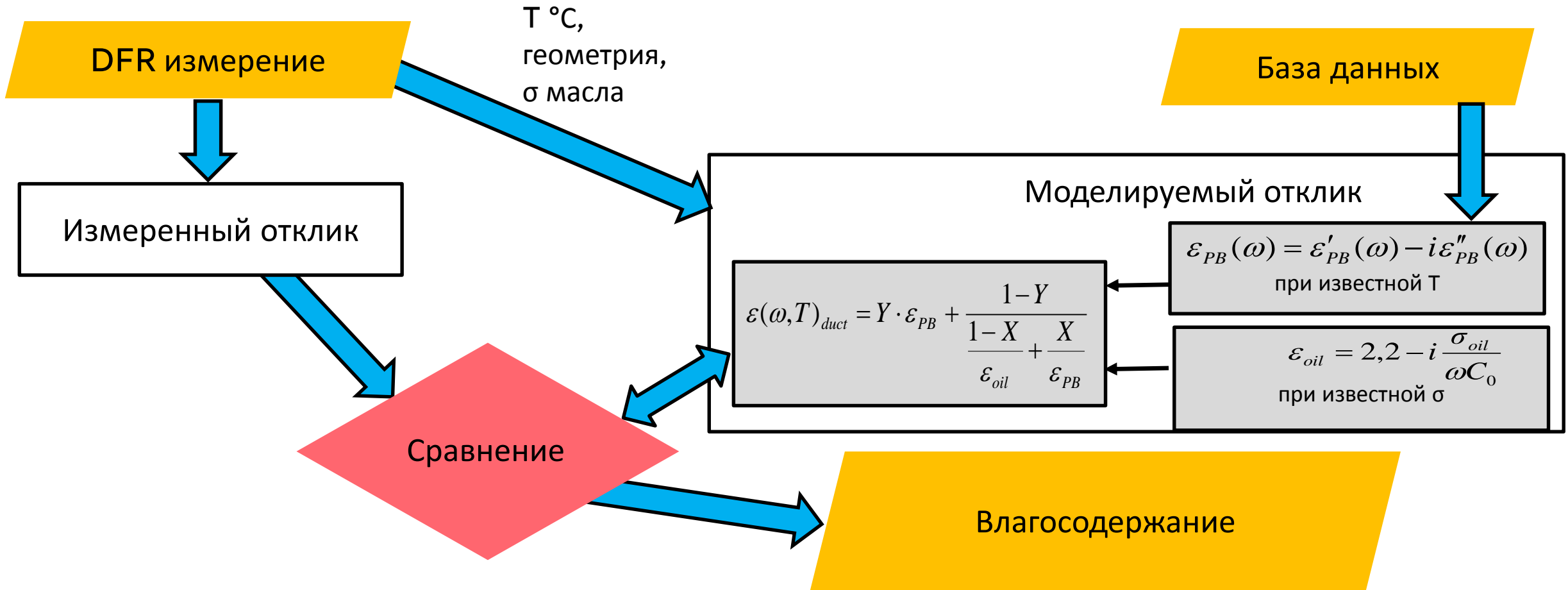


$$\varepsilon(\omega, T)_{duct} = \frac{Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{stick}} + \frac{X}{\varepsilon_{barrier}}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{oil}} + \frac{X}{\varepsilon_{barrier}}}$$

$$\varepsilon(\omega, T)_{duct} = Y \cdot \varepsilon_{PB} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{oil}} + \frac{X}{\varepsilon_{PB}}}$$

# Оценка влагосодержания твёрдой изоляции

Идеальный случай



---

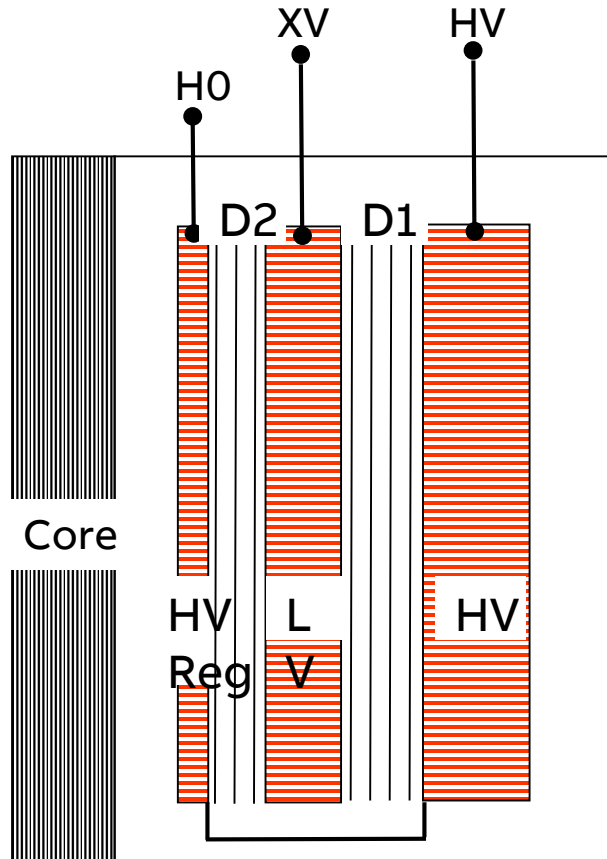
# Метод DFR

## Источники ошибок

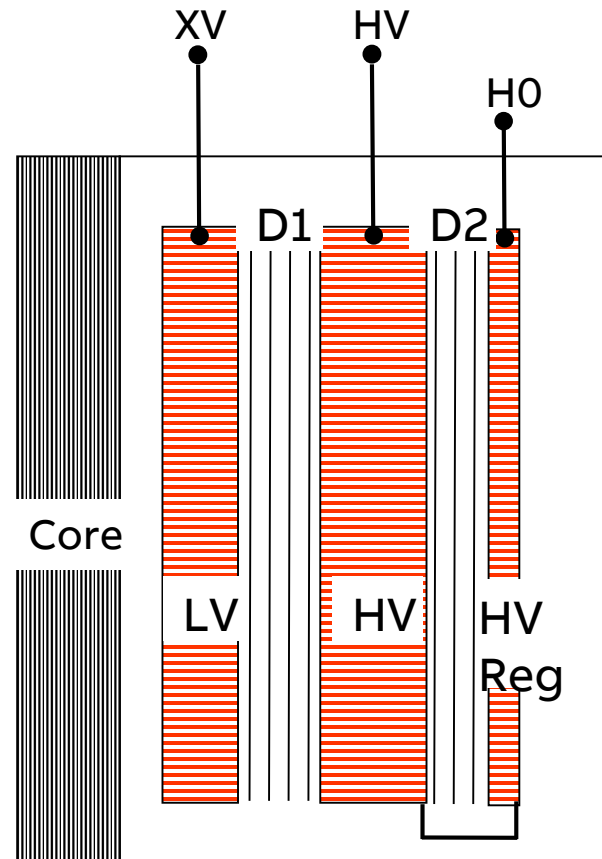
- Температура
- Геометрия
- Локальные загрязнения
- Плотность электрокартона
- Ошибки при измерениях
- Помехи
- И др.

# Dielectric Frequency Response (DFR)

Main tank



CHL => meas. D1//D2



CHL => meas. D1

---

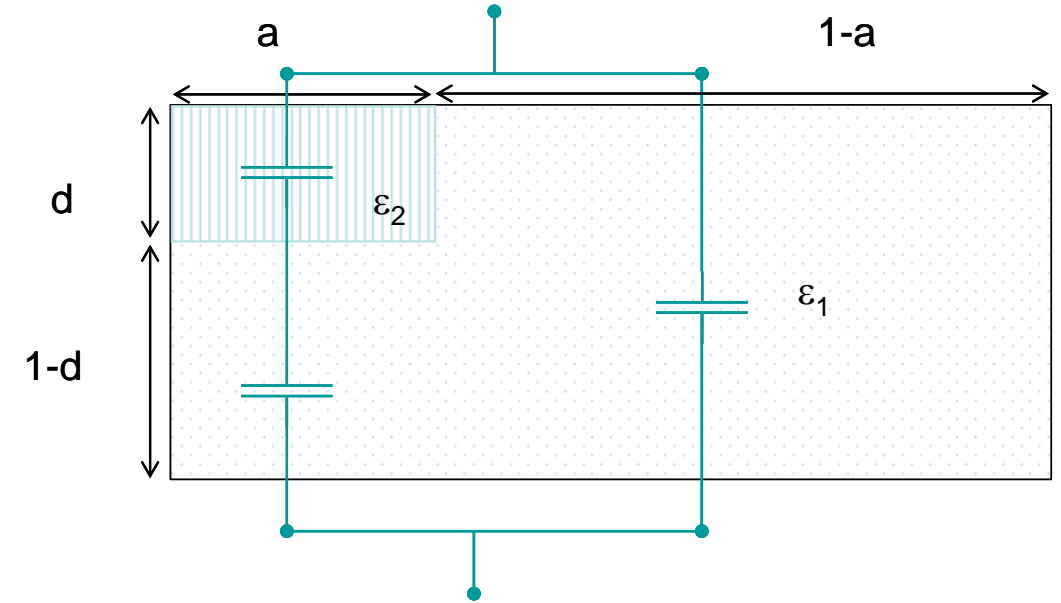
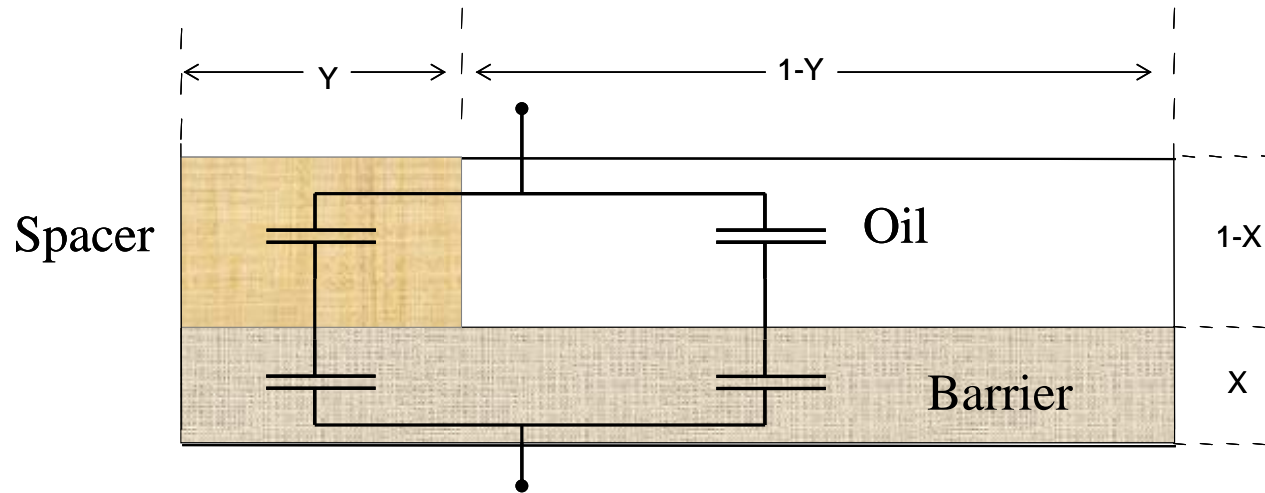
# Метод DFR

## Источники ошибок

- Температура
- Геометрия
- Локальные загрязнения
- Плотность электрокартона
- Ошибки при измерениях
- Помехи
- И др.

# Dielectric Frequency Response (DFR)

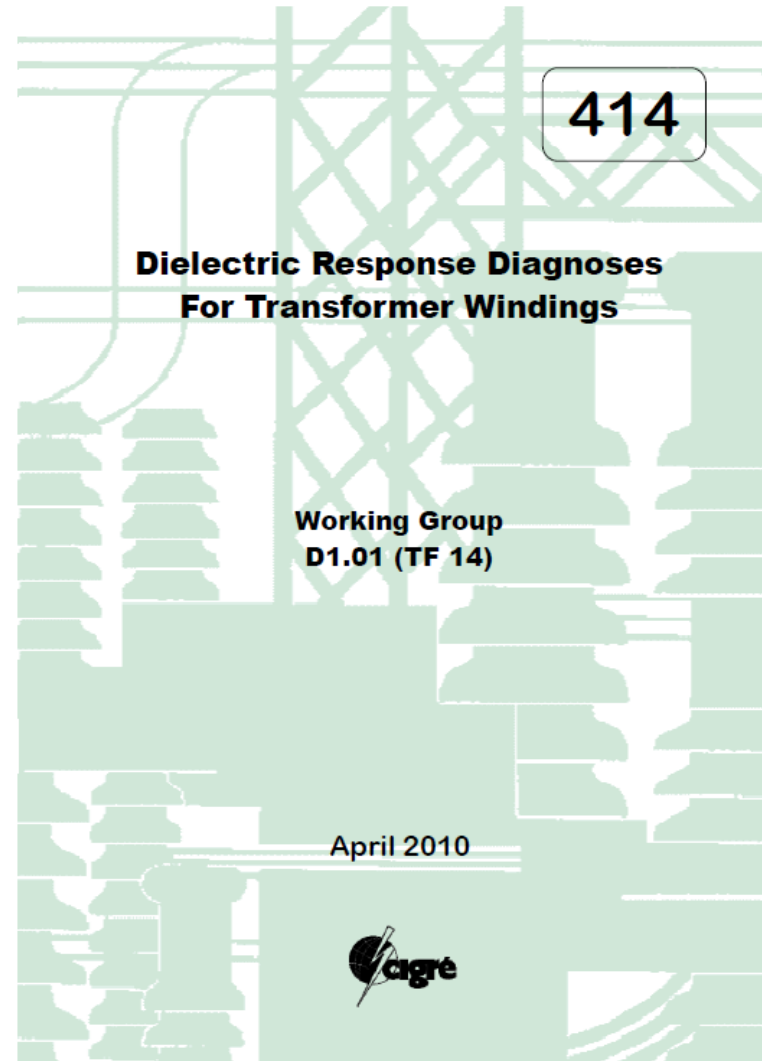
Моделирование слабых мест



# Метод DFR

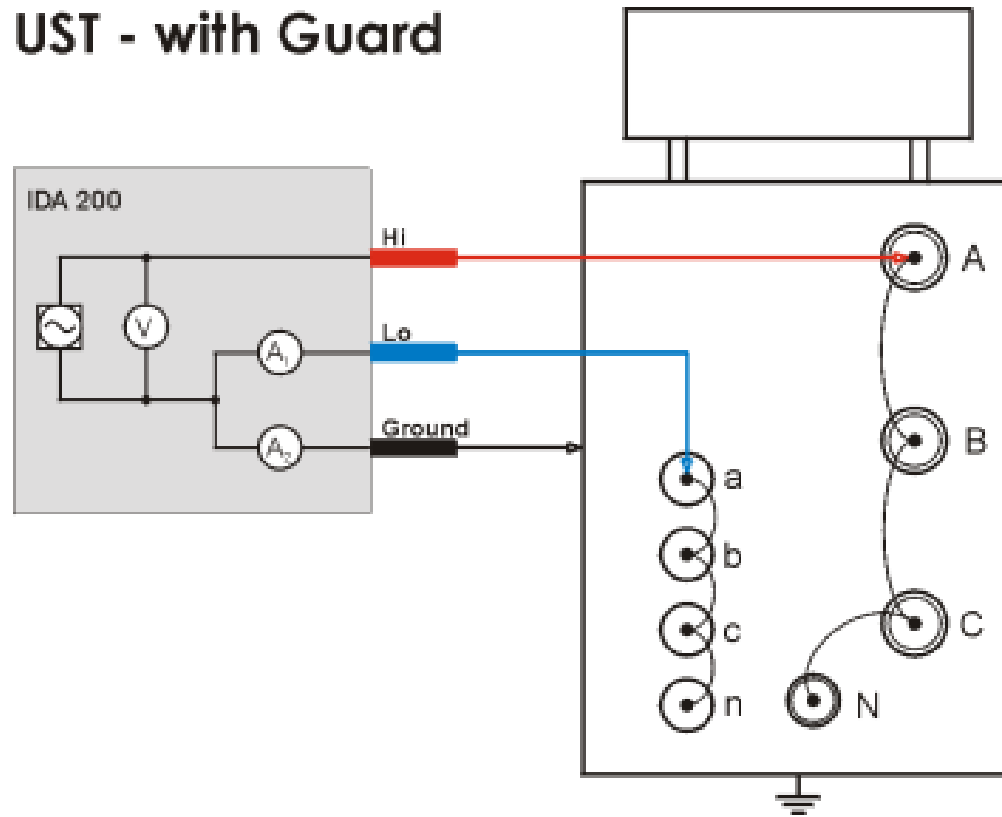
## Источники ошибок

- Температура
- Геометрия
- Локальные загрязнения
- Плотность электрокартона
- Ошибки при измерениях
- Помехи
- И др.



# Dielectric Frequency Response (DFR)

Примеры измерений





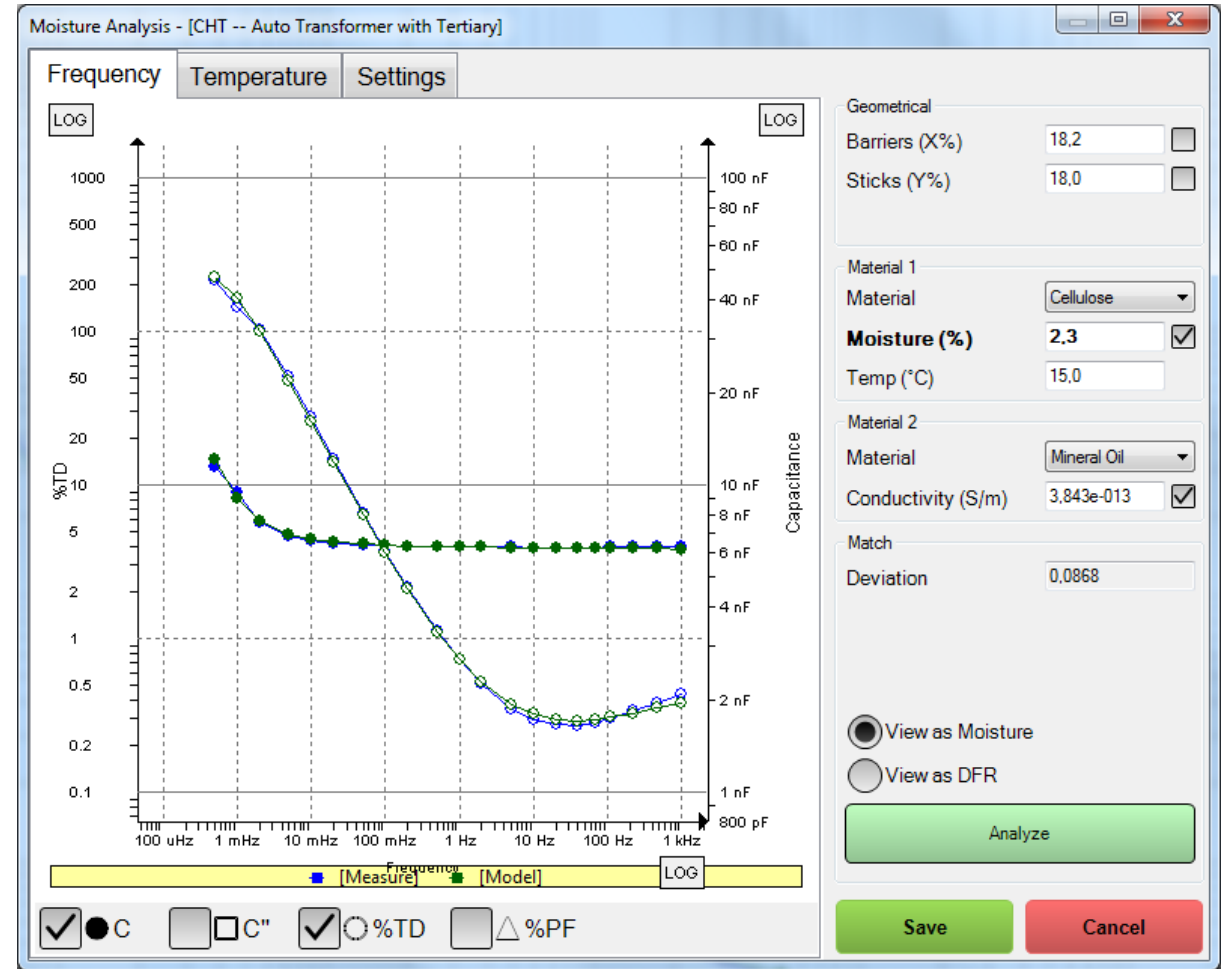
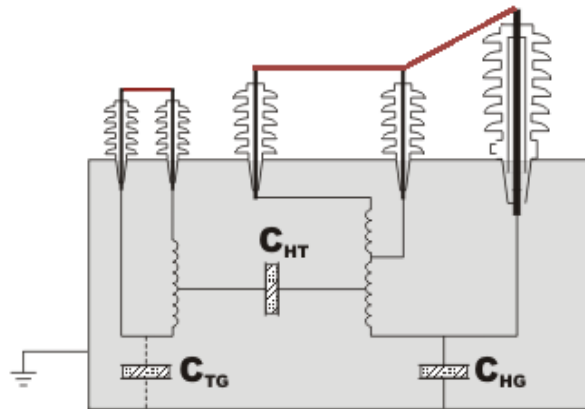
# Dielectric Frequency Response (DFR)

## Пример 1

### Технические характеристики

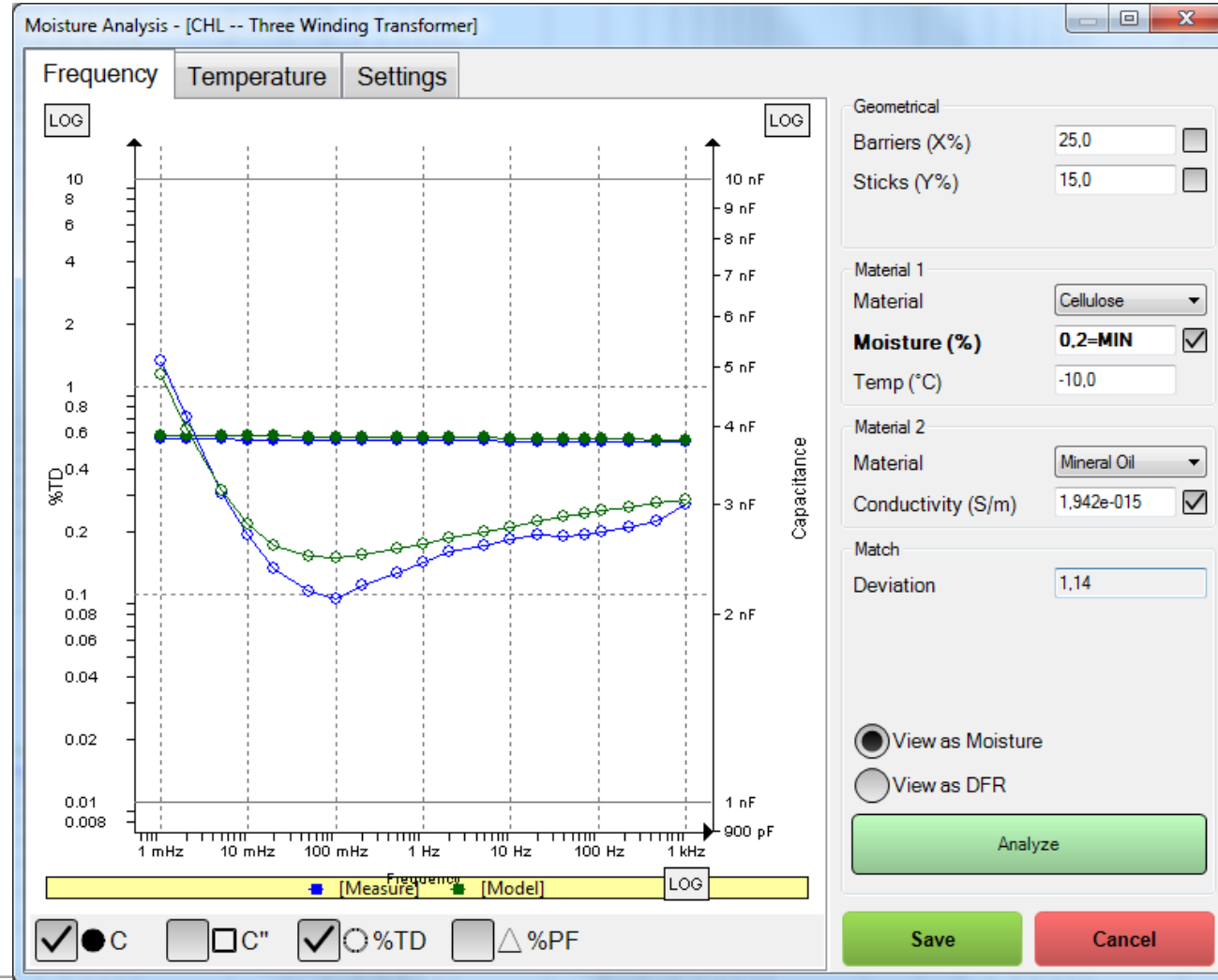
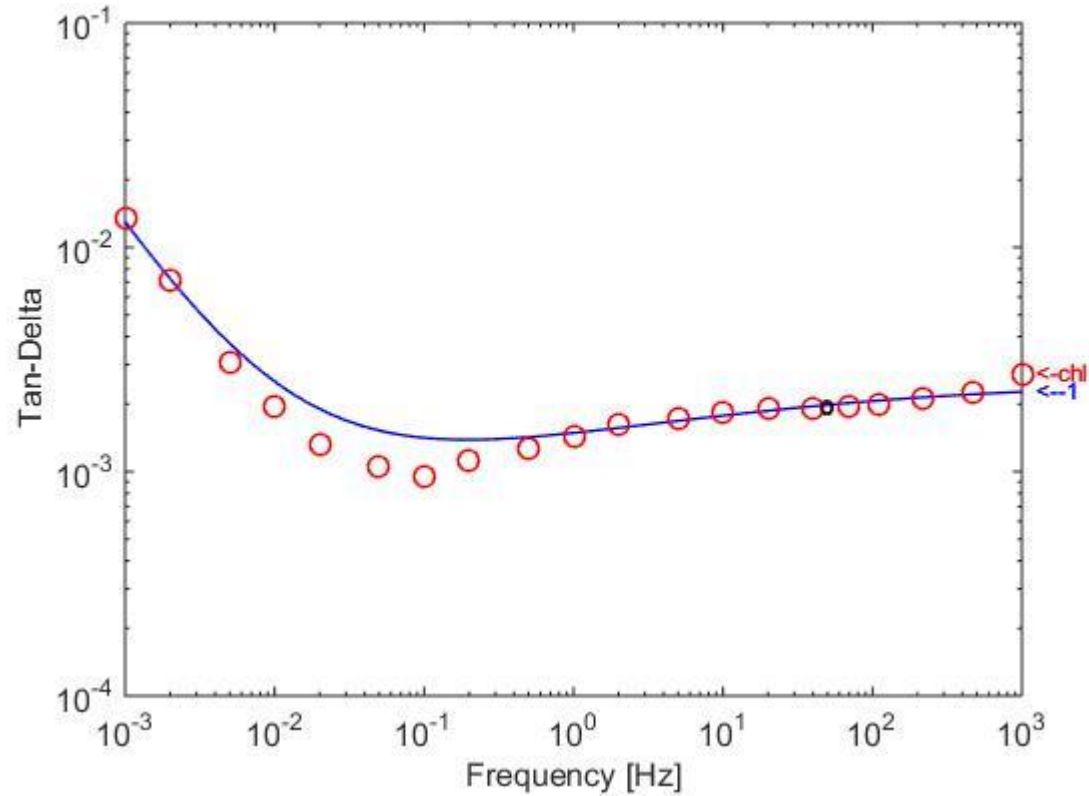
Обмотка	Мощность [кВА]	Напряжение [кВ]	Схема и группа соединения обмоток
А В С	120 000	220	$Y_0$
а б с	120 000	$135 \pm 3 \times 2.5 \%$	auto
u v w	55 000	10,5	d

Год выпуска: 1965



# Dielectric Frequency Response (DFR)

Пример 2

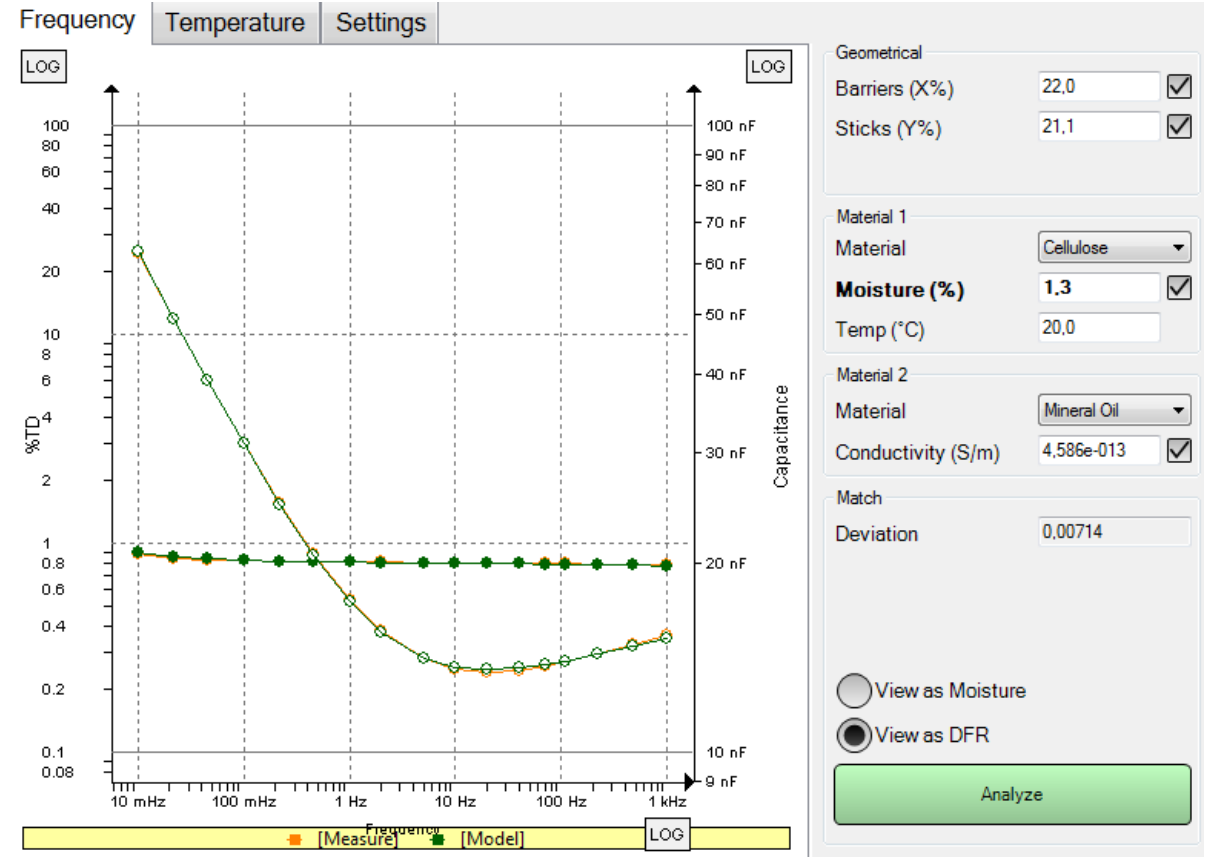
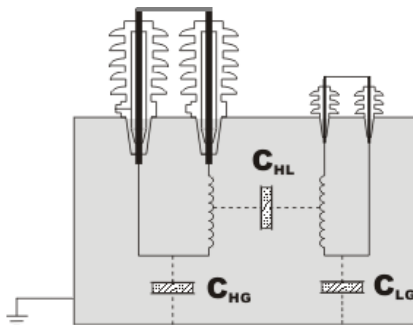


# Dielectric Frequency Response (DFR)

## Пример 3

### Технические характеристики

Обмотка	Мощность [кВА]	Напряжение [кВ]	Схема и группа соединения обмоток
A B C	25 000	75±9x1,67%	YNyn0
a b c	25 000	6,6	
Год выпуска: 1977			



Спасибо за внимание 

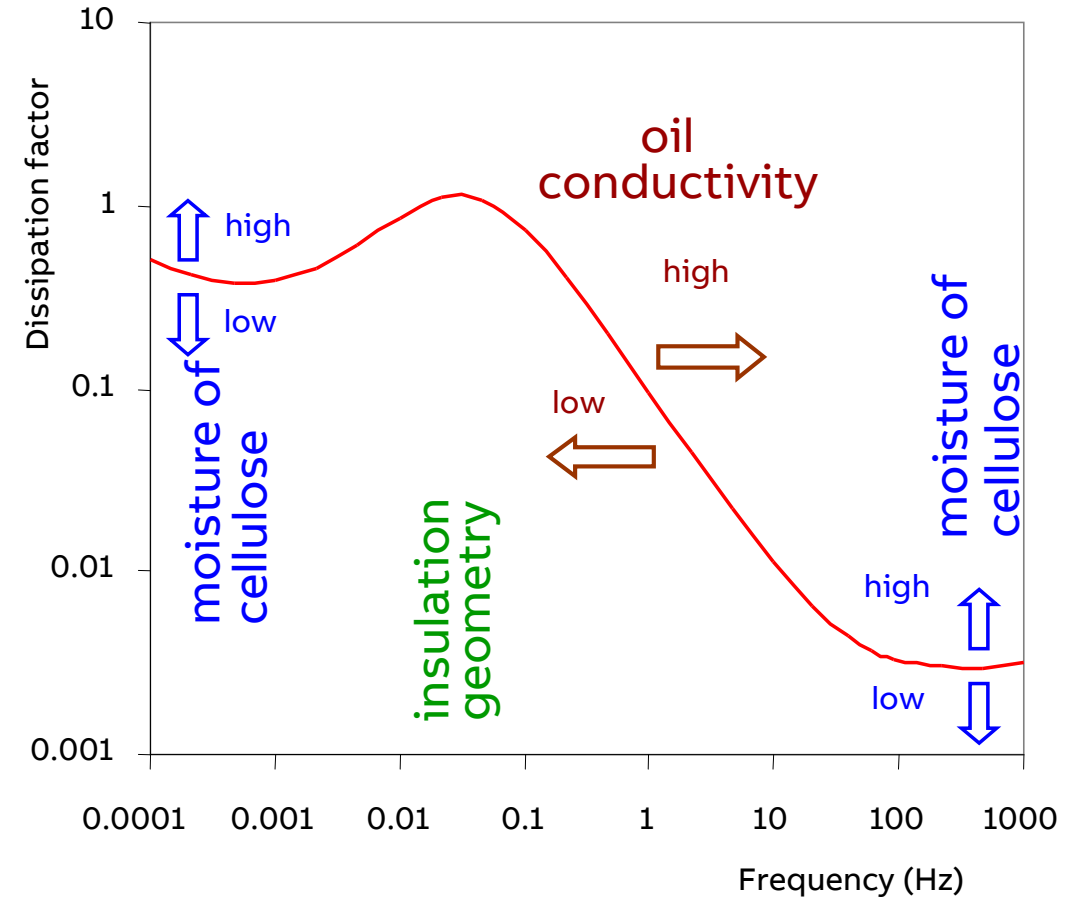
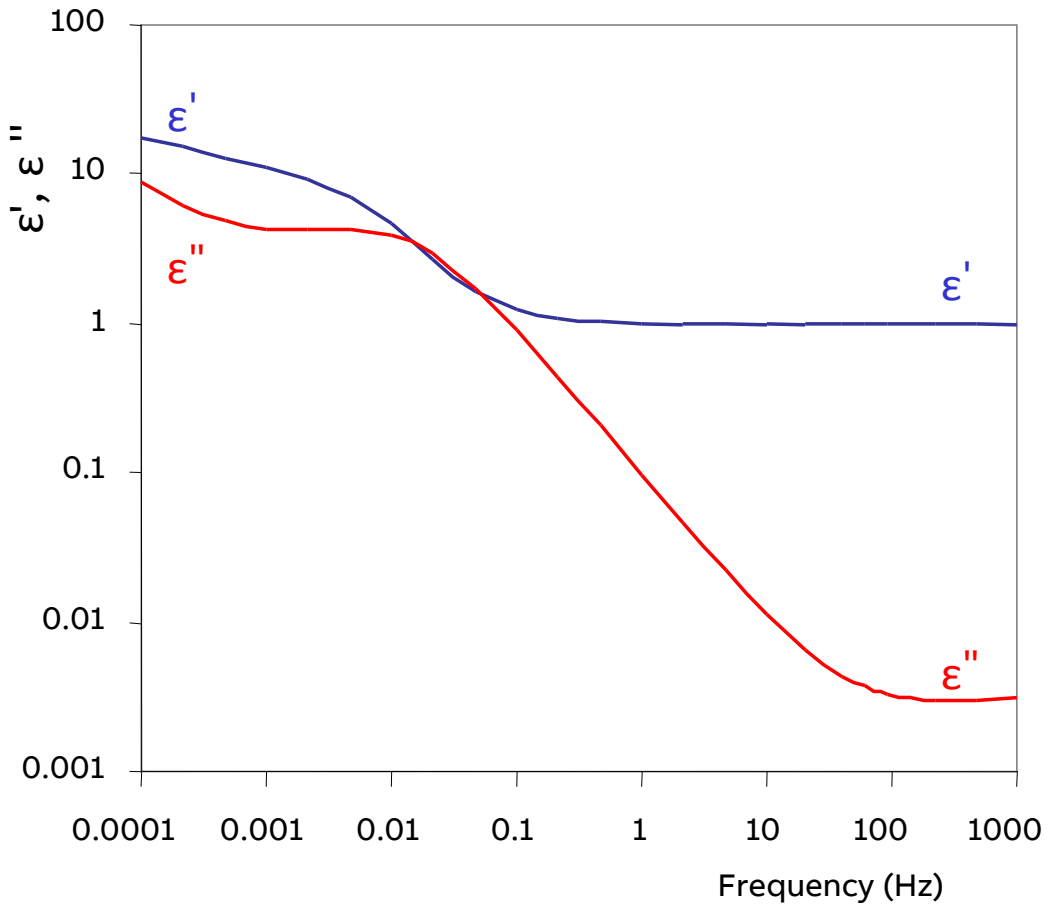




**AABB**

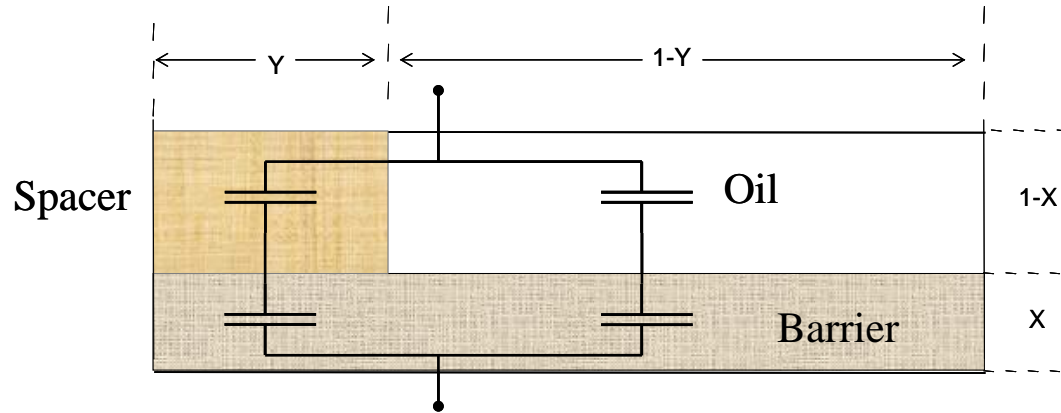
# Частотный отклик изоляции трансформатора

Влияние различных факторов



# Частотный отклик изоляции трансформатора

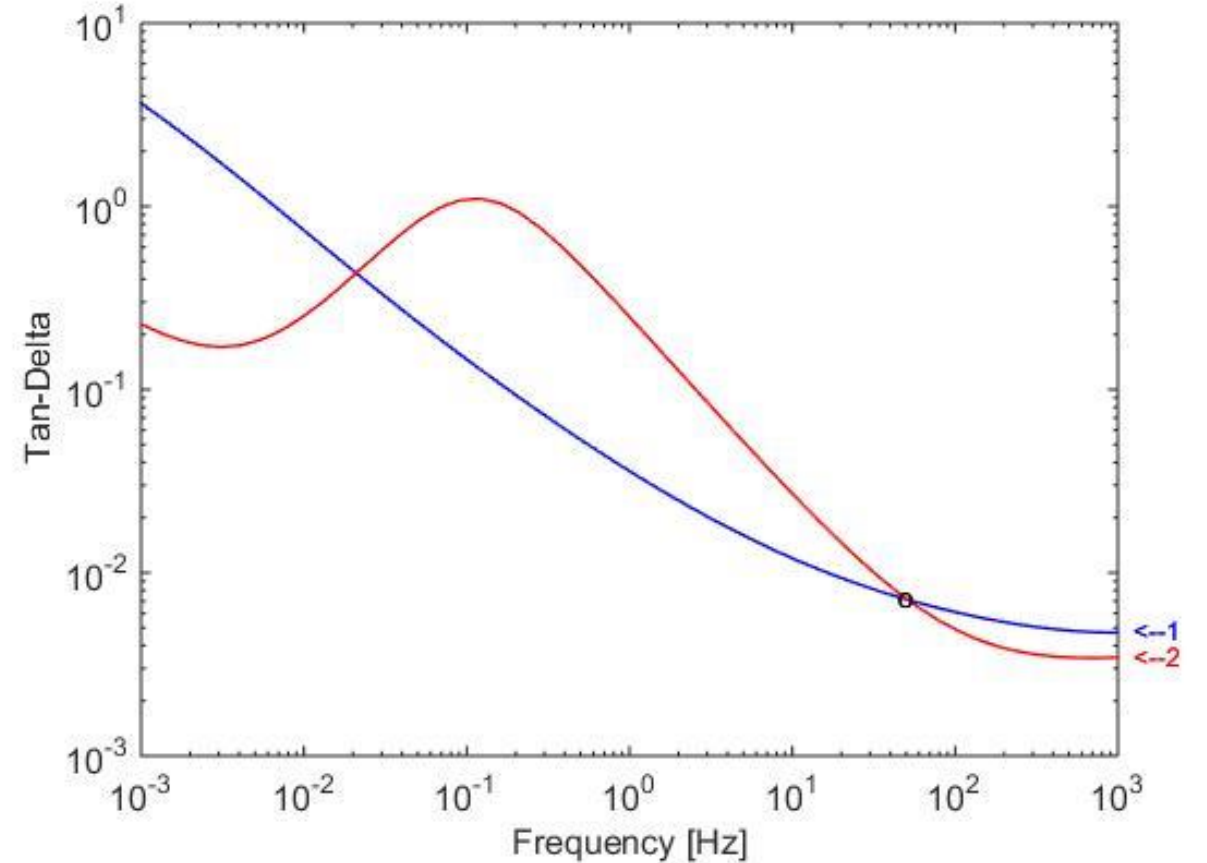
Влияние проводимости масла и влагосодержания твёрдой изоляции



$X = 20 \%$ ,  $Y = 20 \%$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$\sigma = 1 \text{ pS/m}$ , влагосодержание 3,5 %

$\sigma = 50 \text{ pS/m}$ , влагосодержание 1 %



# Частотный отклик изоляции трансформатора

50 Гц и широкий частотный диапазон

