

**ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина**

**НОЦ Высоковольтные цифровые измерительные преобразователи и трансформаторы
Кафедра Автоматического управления электроэнергетическими системами**



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ И ЦИФРОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

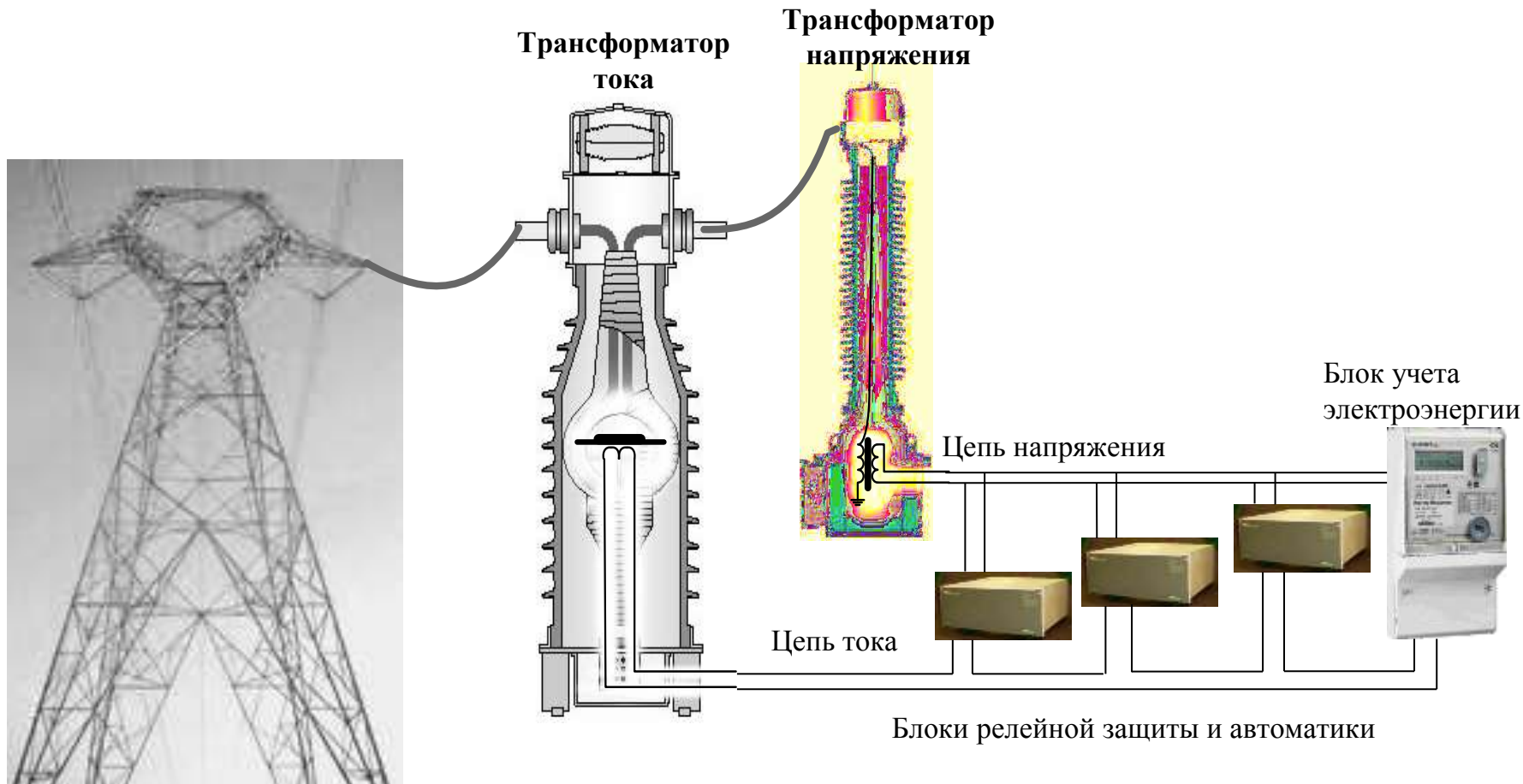
**Лебедев Владимир Дмитриевич,
заведующий кафедрой
Автоматического управления
электроэнергетическими системами**

**Яблоков Андрей Анатольевич,
аспирант кафедры АУЭС,**

г. Иваново

2015

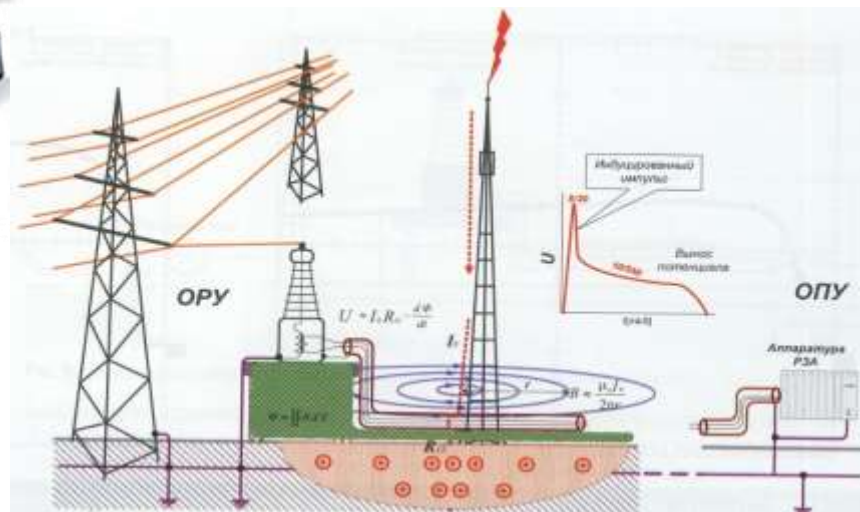
Измерение токов и напряжений традиционными трансформаторами тока и напряжения



Большая протяжённость вторичные цепей трансформаторов тока и напряжения по территории ОРУ приводит к большим наводкам, что негативно сказывается на работе систем релейной защиты и автоматики



Наибольшие воздействия возникают во время разрядов атмосферного электричества и во время коротких замыканий

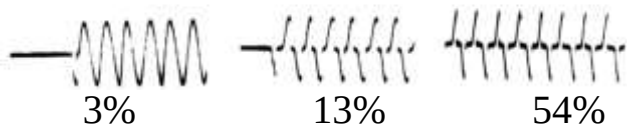


Насыщение магнитопроводов трансформаторов тока и напряжения

✓Токи коротких замыканий, токи с апериодическими составляющими приводят к **насыщению** сердечников трансформаторов тока, к значительной погрешности измерения токов, к ошибкам в работе РЗА



Ток вторичной цепи трансформатора тока при насыщении магнитопровода

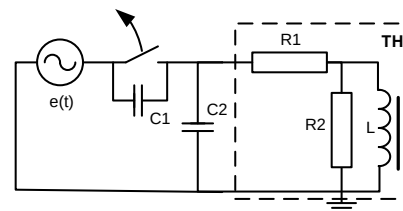


Форма вторичного тока ТТ при аварийных режимах (сверхтоки). В процентах указана погрешность ТТ

✓**Феррорезонанс** возникает при размыкании высоковольтного выключателя содержащего ёмкости выравнивающие поле



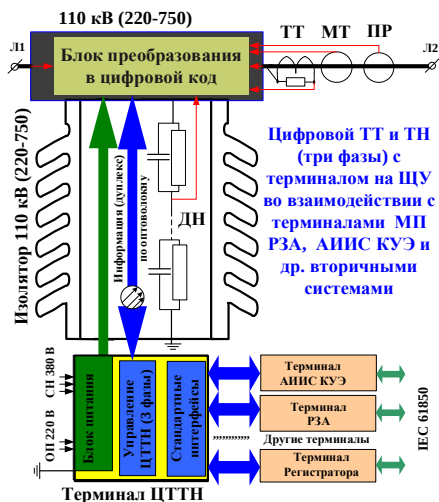
Схема замещения



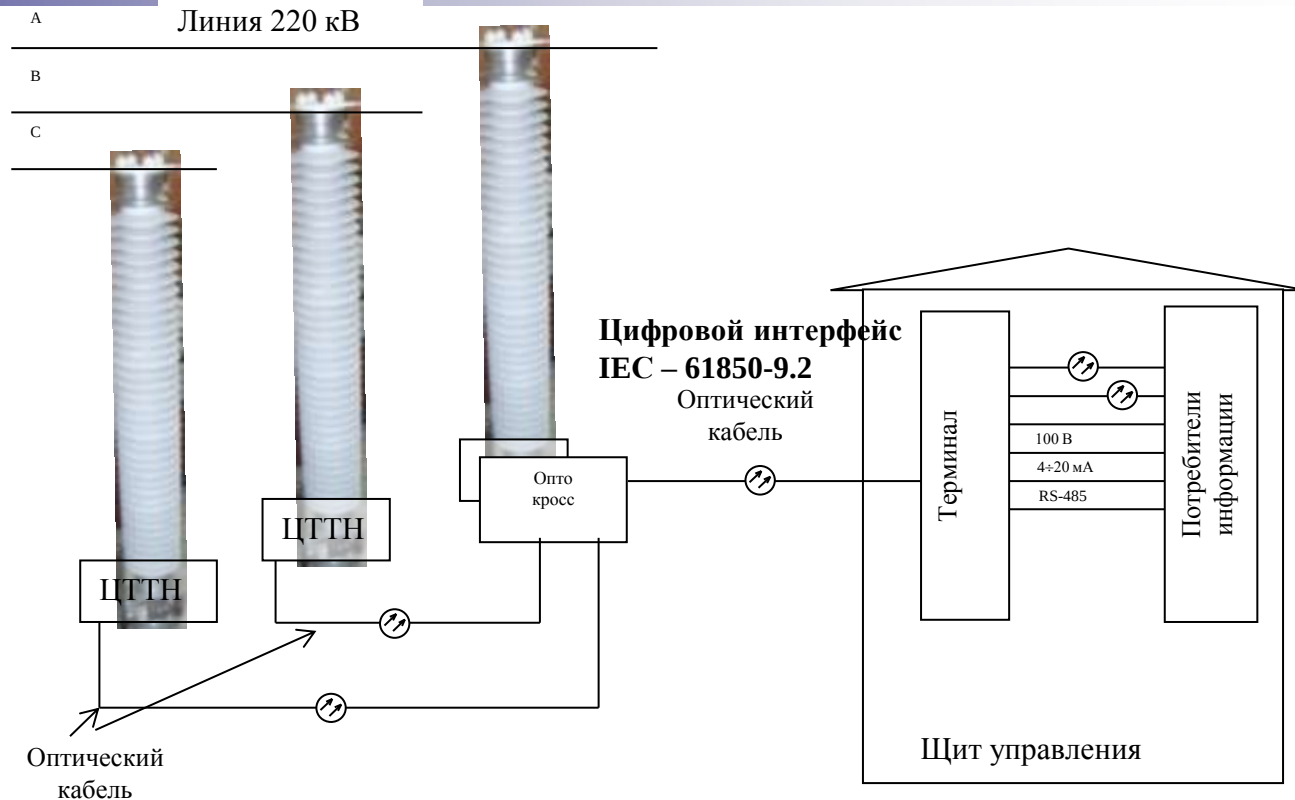
C1 – емкости делителей напряжения коммутируемого выключателя;
C2 – суммарная емкость на землю ошиновки, и другой высоковольтной аппаратуры, подключенной к системе шин;
R1 – активное сопротивление первичной обмотки ТН;
R2 – сопротивление активных потерь магнитопровода ТН.

РЕШЕНИЕ: ОПТИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОННЫЕ, ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

трёхфазная группа измерительных преобразователей с терминалом приёма на щите управления

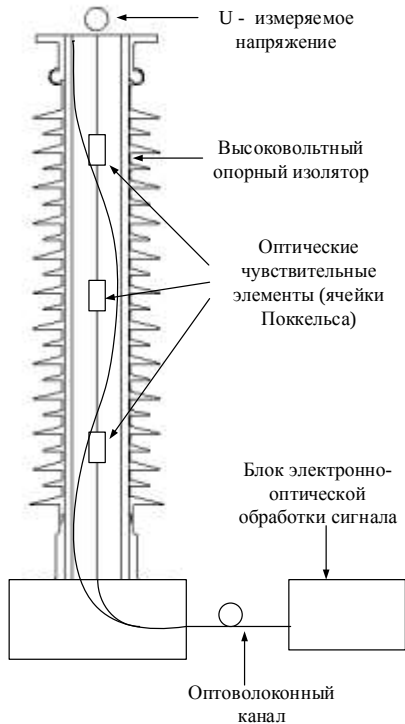


Структура цифрового измерительного трансформатора с оптоэлектронным интерфейсом



ОРУ подстанции

К исследованию поля оптических трансформаторов напряжения



Трехфазный комплект измерительных трансформаторов напряжения

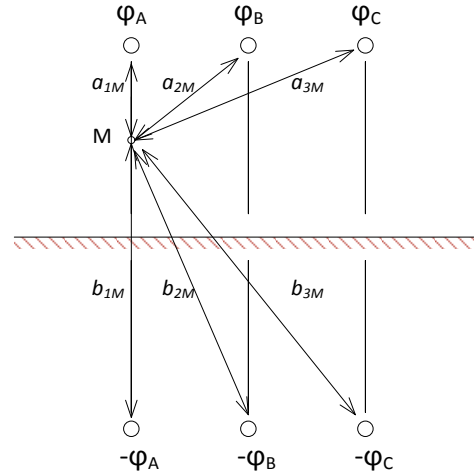


Схема замещения для расчета электрического поля чувствительных элементов

Уравнения для расчета напряженности электрического поля

$$|\vec{E}_i| = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r_{iM}} \quad E_y^M = \sum_{i=1}^n E_y^{iM}$$

$$\begin{cases} \tau_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3; \\ \tau_2 = \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3; \\ \tau_3 = \beta_{31}\varphi_1 + \beta_{32}\varphi_2 + \beta_{33}\varphi_3, \end{cases}$$

$$[\alpha] = [\beta]^{-1}$$

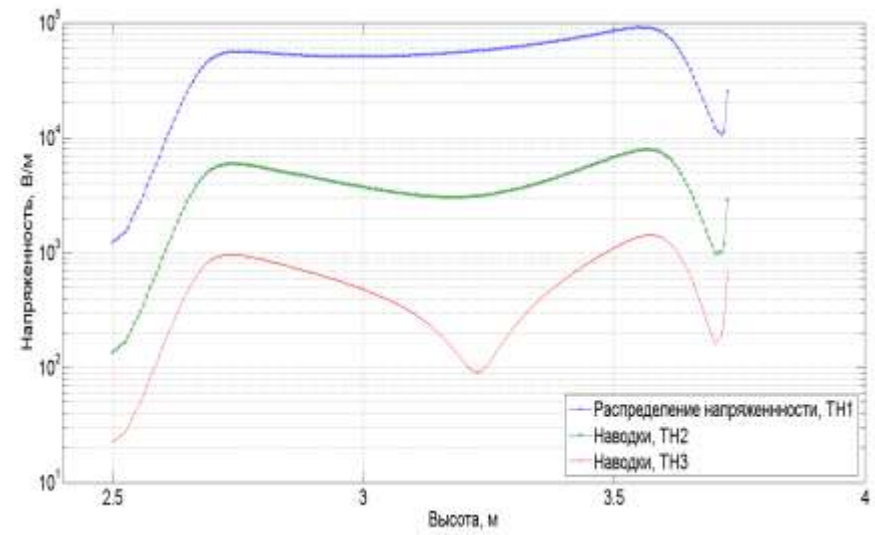
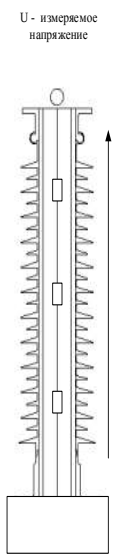
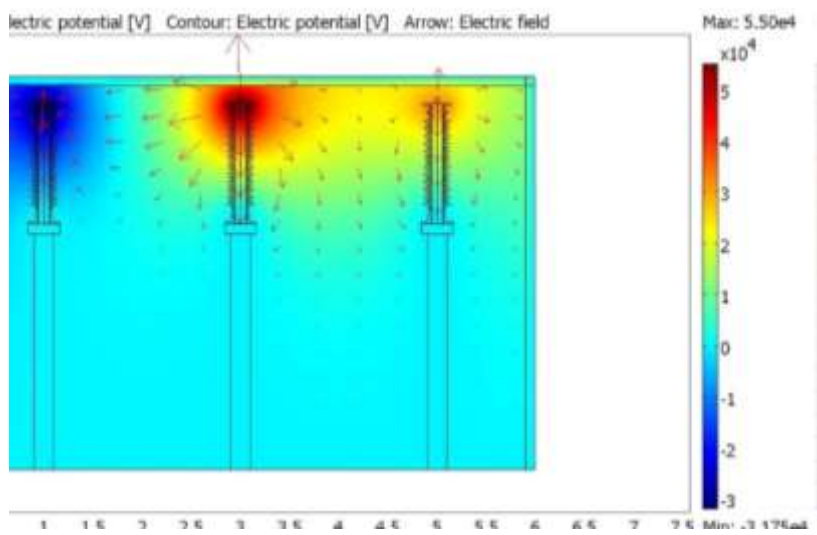
$$\alpha_{km} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{b_{km}}{a_{km}}, \quad \alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{2 \cdot h}{r}$$

К исследованию поля оптических трансформаторов напряжения

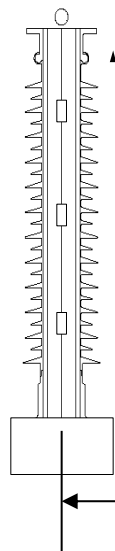
Исследование электрического поля в оптических трансформаторах напряжения на основе решения уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}$$

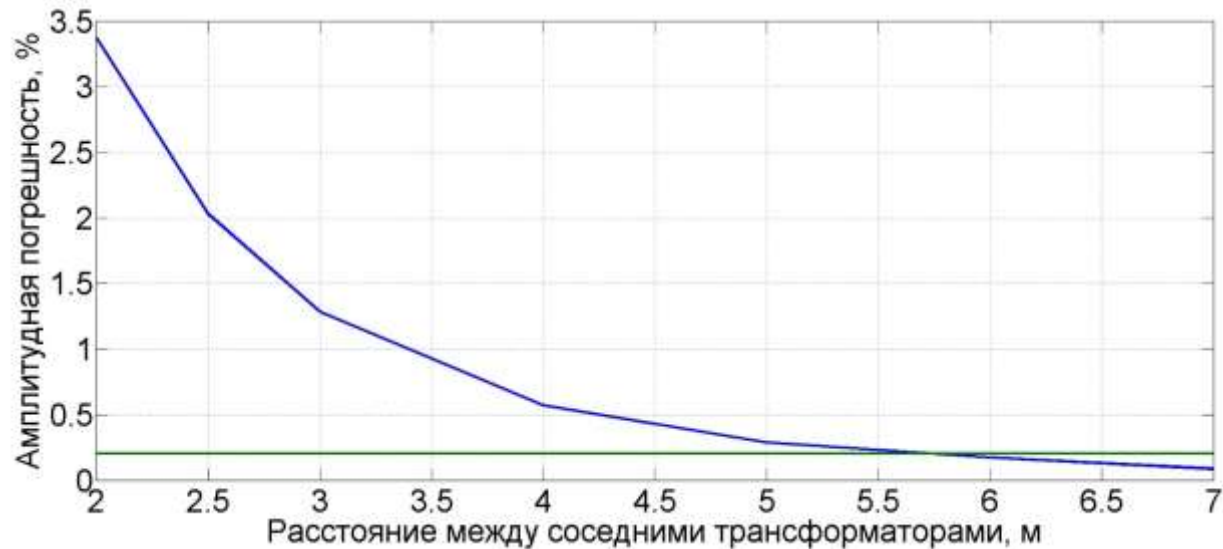
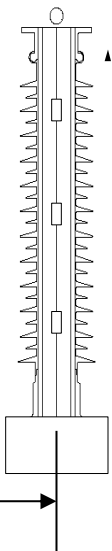
Распределение напряженности электрического поля вдоль столба изолятора с чувствительными элементами электрического поля



U - измеряемое
напряжение



U - измеряемое
напряжение



Выводы

1. Оптический трансформатор напряжения на базе полого опорного изолятора имеет низкую помехозащищённость, влияние окружающих предметов значительно превосходит требуемую погрешность измерений.
2. Изоляция в виде элегаза (азота) не позволяет достичь необходимого уровня защиты от внешних помех.
3. Применение диэлектрического экранирования затруднено отсутствием соответствующих материалов одновременно с высокой диэлектрической проницаемостью, электрической прочностью и стабильностью диэлектрических характеристик.

К исследованию поля резистивного делителя напряжения цифрового трансформатора напряжения

Разработка резистивного делителя напряжения связана с решением задачи оптимизации параметров элементов и материалов с целью обеспечения:

- Минимальное тепловыделение на резисторах;
- Минимальное влияние токов электрического смещения;
- Снижение температурного коэффициента сопротивления за счет подбора параметров изолирующего герметика, резистивных элементов и их расположения;
- Использование стандартной элементной базы

$$TKC \rightarrow \min$$

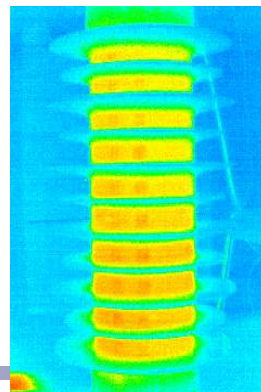
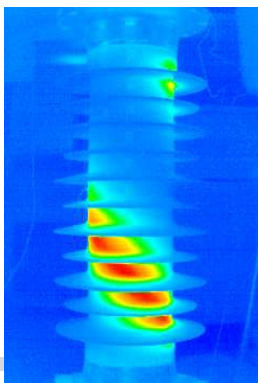
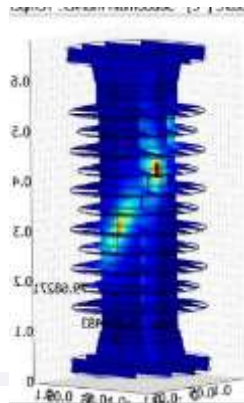
$$\Delta T \leq 30^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{\text{герм}} \rightarrow \max$$

$$I_C^k \rightarrow \min$$

$$U_{\text{выд}} \geq U_{\text{грозн.имп.}}$$

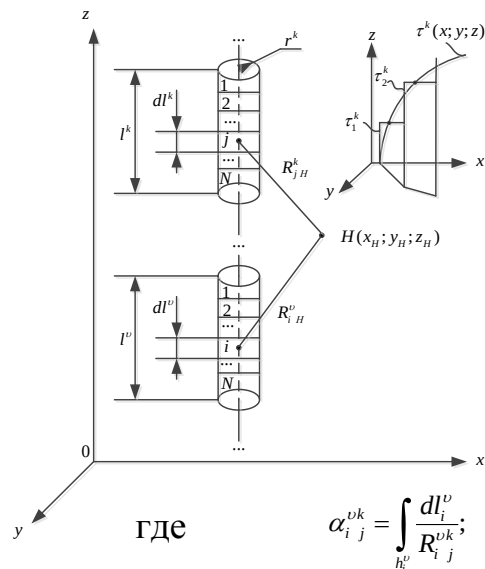
$$C_{\text{РД}} \rightarrow \min$$



К исследованию поля резистивного делителя напряжения цифрового трансформатора напряжения

Математическая модель расчета электрического поля

Геометрия модели резистивного делителя



$$\varphi_H = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \left[\sum_{k=1}^K \left(\int_{L_k} \frac{\tau_k(l_k) dl_k}{R_{kH}} \right) \right] \quad (1)$$

$$\varphi_{cp,j}^k = \sum \left[\sum (\tau_i^v \alpha_{ij}^{vk}) \right] \quad (2)$$

Уравнения модели в матричной форме

$$[\alpha][\text{Re}(\dot{\tau})] = [\text{Re}(\dot{\varphi}'_{cp.})];$$

$$[\alpha][\text{Im}(\dot{\tau})] = [\text{Im}(\dot{\varphi}'_{cp.})];$$

$$[\tau] = [\alpha]^{-1} [\varphi'_{cp.}];$$

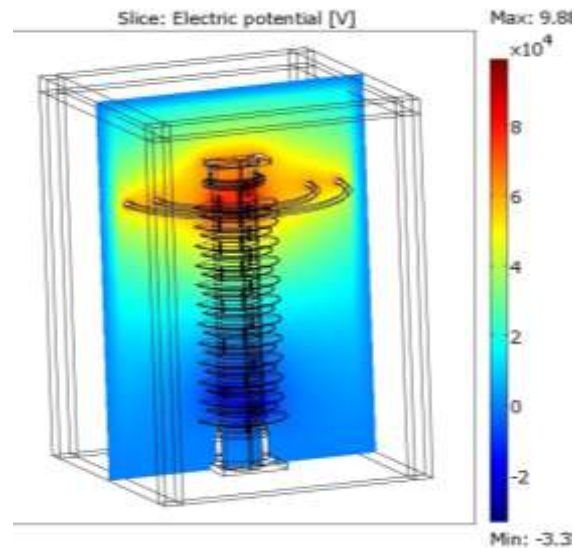
$$[Q] = \frac{l_k}{N} \cdot [\tau^*];$$

$$[I] = \omega [Q].$$

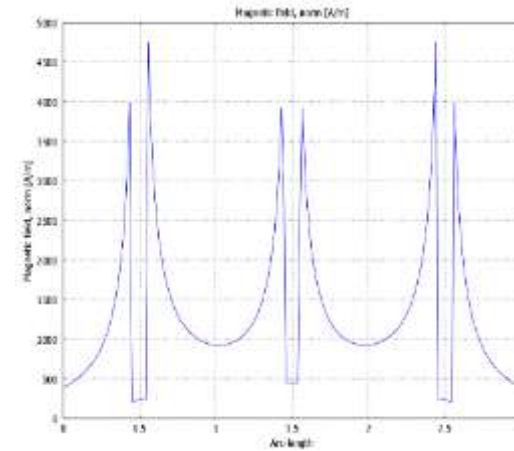
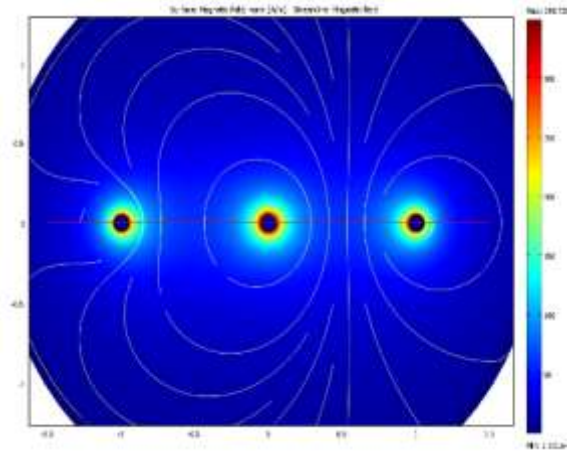
Математическая трехмерная модель распределения электрического поля

$$-\nabla(\sigma + j\omega\epsilon\epsilon_0)\nabla\varphi = 0$$

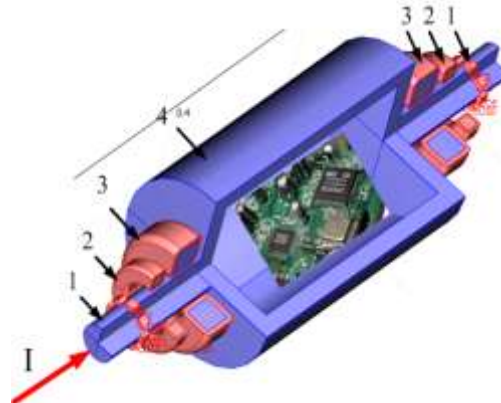
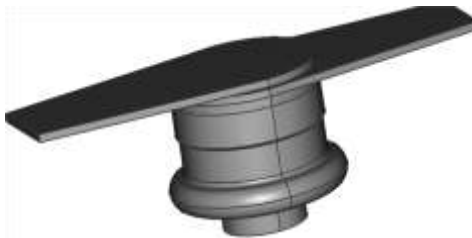
в сочетании с цепными уравнениями



Магнитное поле трёхфазной системы токопроводов



Конструкции верхней части измерительного преобразователя тока



- 1 – магнитотранзисторное кольцо;
- 2 – пояс Роговского;
- 3 – электромагнитный трансформатор тока;
- 4 – токопроводящий цилиндр с полостью для размещения электронного модуля

■ Исследование экранирующего эффекта от внешних полей

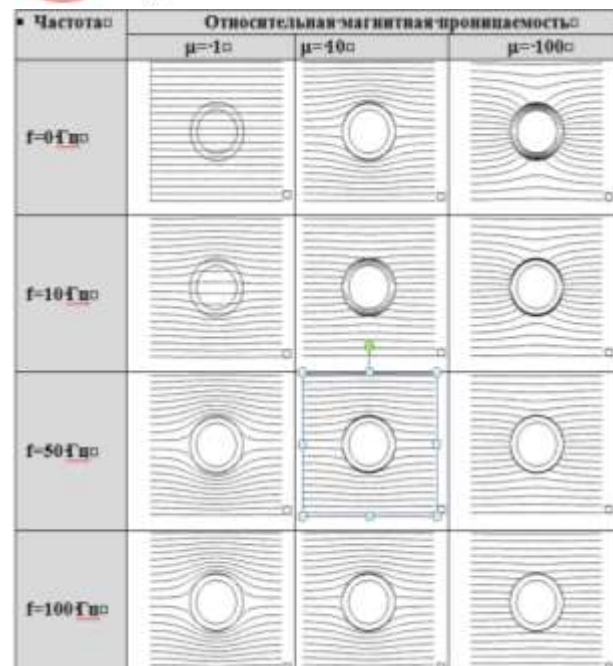
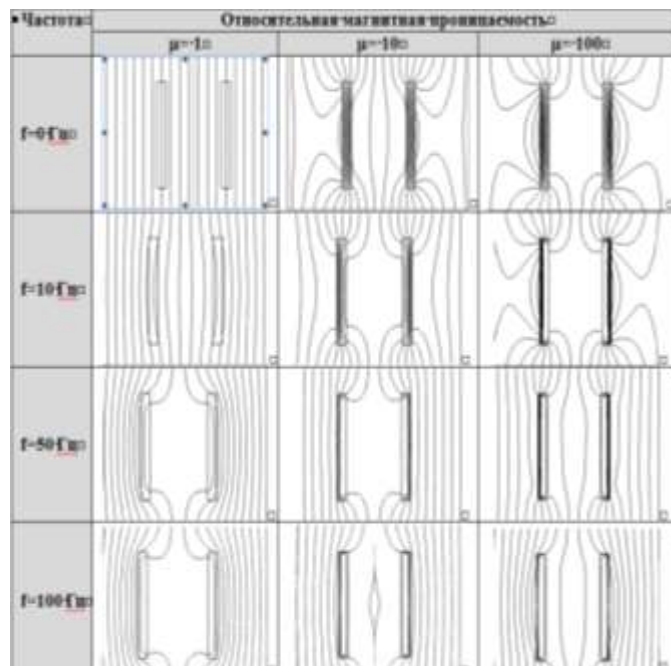
Простые модели для анализа экранирующего эффекта



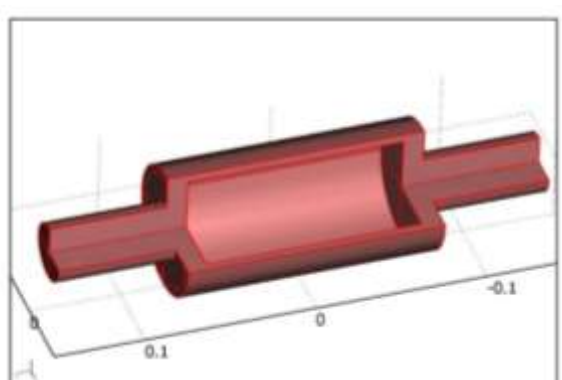
$$b_Q = \ln \left| \frac{H_0}{H_i} \right| \approx \begin{cases} \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{\omega \mu_0 \gamma D d}{2m} \right)^2 \right] & \text{if } d < \delta, \\ \frac{d}{\delta} + \ln \frac{\mu_0}{\mu} \cdot \frac{D}{2\sqrt{2}m\delta} & \text{if } d > \delta, \end{cases}$$



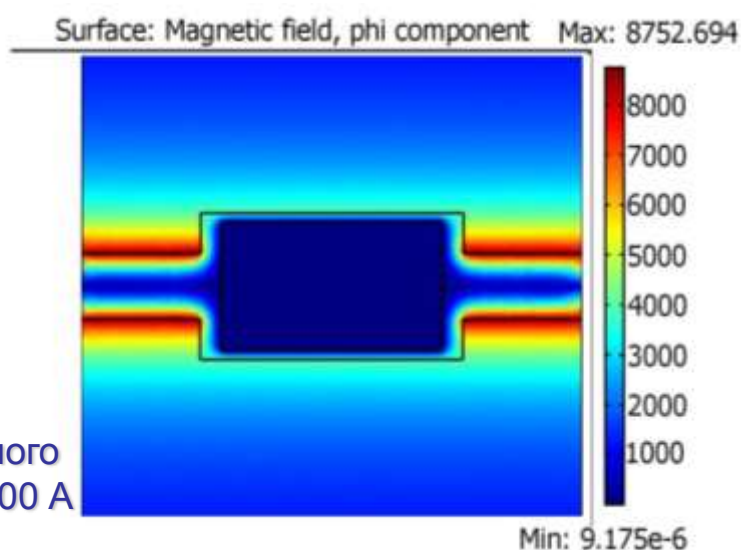
$$k_y = \frac{H_0}{H_i} = 1 + \frac{(\mu - 1)}{4\mu} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right)$$



Обеспечение работы электроники в зоне сильных электрических и магнитных полей высоковольтного провода



Расчет напряженности [А/м] магнитного поля в трубе при первичном токе 1000 А



Результаты расчёта:
магнитное поле внутри на
9 порядков меньше, чем в
месте установки ТТ и МТ
пояса

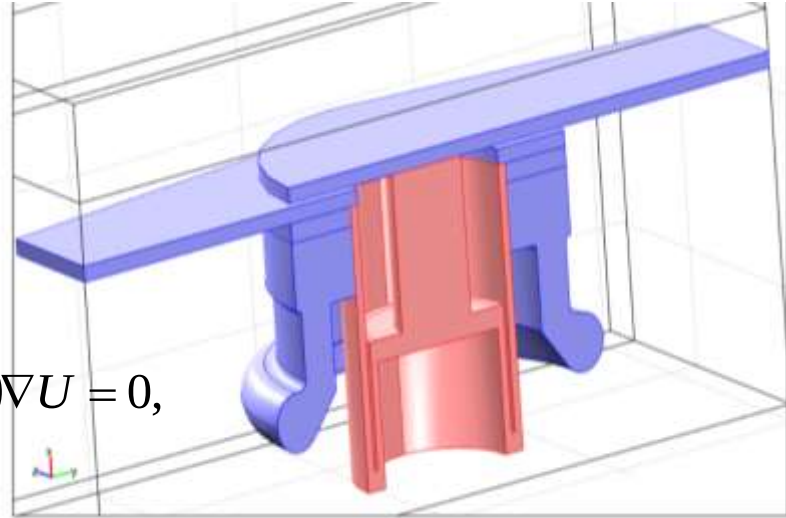
- Результаты расчета показывают, что электромагнитная совместимость работы электроники ЦТТН обеспечивается до токов 200 кА.
- На ХК «Электрозавод» был испытан прототип ЦТТН, проведено 8 опытов короткого замыкания (до 34 кА) с апериодической составляющей.
- Результаты испытаний подтвердили надежную работу электроники в разработанной конструкции при воздействии сильных электромагнитных полей.



Геометрия математической модели

Уравнения
электромагнитного г

$$(j\omega\gamma)\vec{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \vec{A}) + (\gamma) \nabla U = 0,$$
$$-\nabla((j\omega\gamma)\vec{A} + (\gamma) \nabla U) = 0.$$



∇ - дифференциальный оператор Гамильтона,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, - относительная магнитная проницаемость,

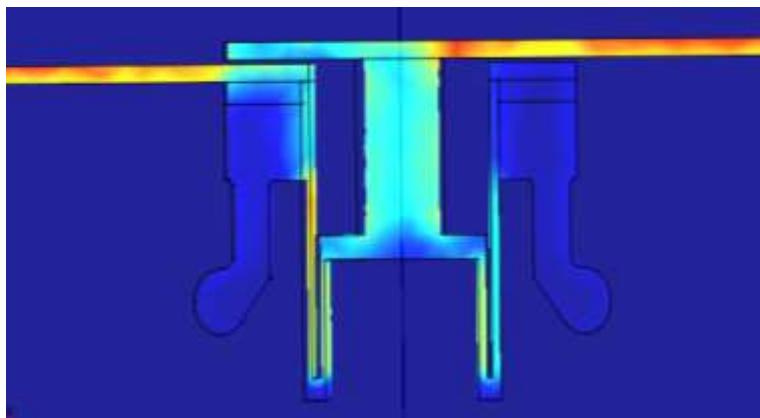
$\vec{A}$ - векторный магнитный потенциал,

$\vec{J}$ - вектор плотности сторонних токов.

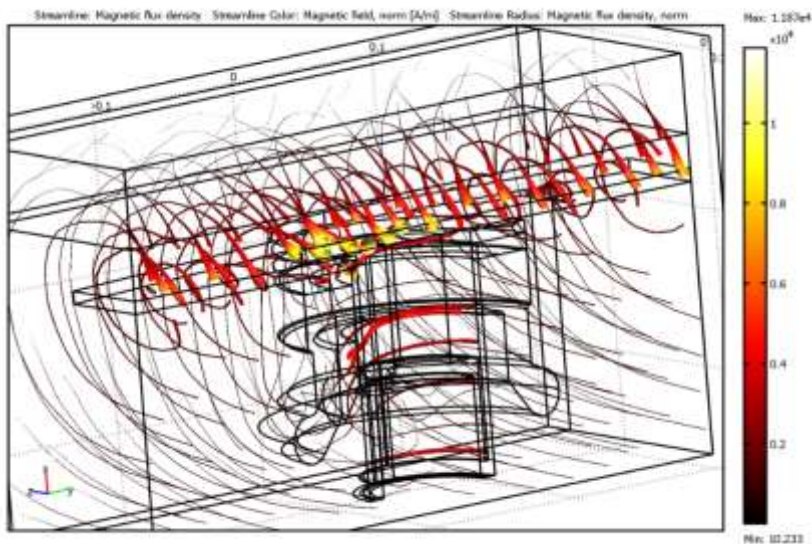
$\omega = 2\pi f$ - угловая частота,

σ - электропроводность (проводника обмотки).

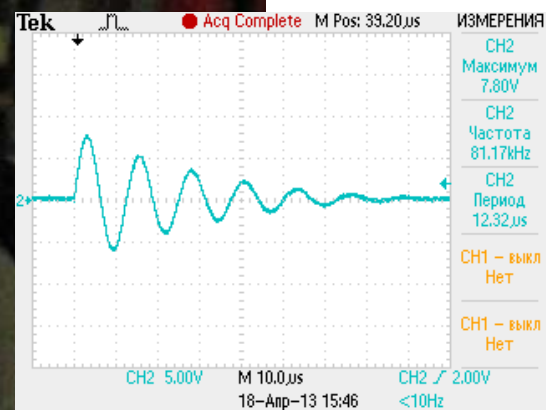
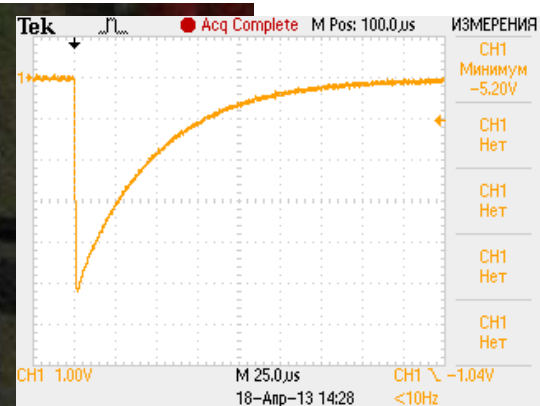
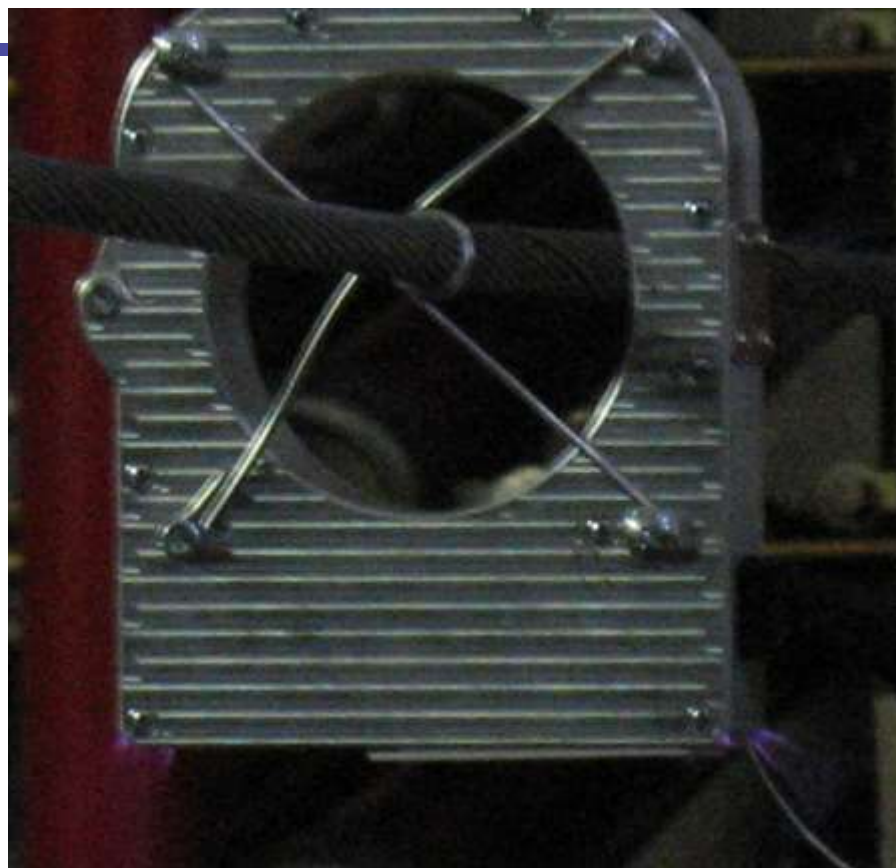
Распределение вектора плотности тока



Картина магнитного поля



Проверка работоспособности в лабораторных условиях



Измерительные преобразователи тока с поясами Роговского в составе дифференциально-фазной защиты, установленные в опытную эксплуатацию



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ