КАЗАНЬ, 1 – 3 ОКТЯБРЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

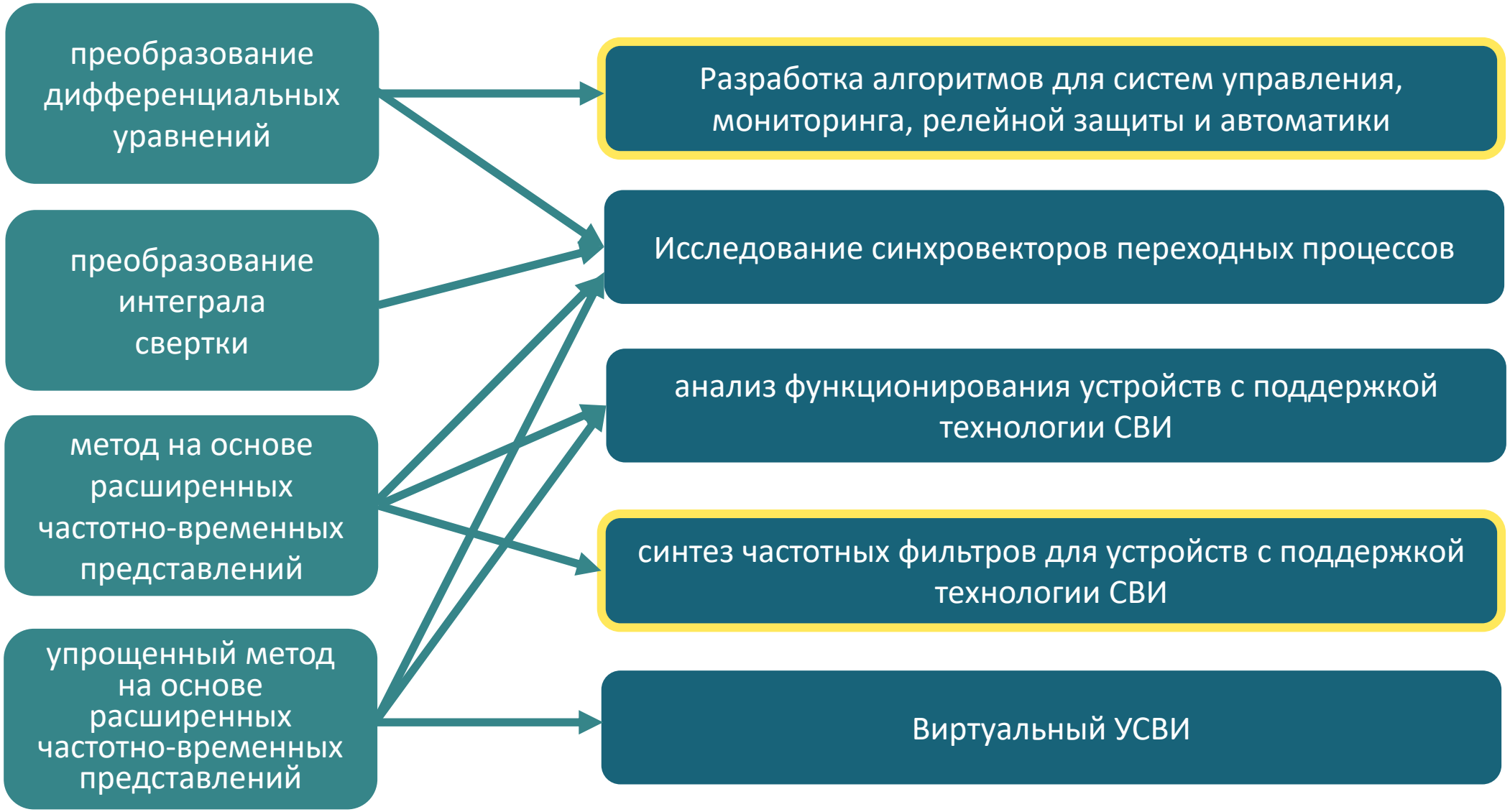
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ – 2025

инженерный центр энергосервис

# Развитие теории синхронизированных векторных измерений

**Мокеев Алексей Владимирович**
**заместитель генерального директора**
**ООО «Инженерный центр «Энергосервис»**
**Россия**

# АНАЛИЗ СИНХРОВЕКТОРОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ



# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ

**Дифференциальное уравнение линии**

$$\Delta u(t) = R_л i(t) + L_л \frac{di(t)}{dt}$$

**Метод комплексных амплитуд**

$$\Delta u(t) \to \Delta \dot{U} e^{j\omega_0 t},\ i(t) \to \dot{I} e^{j\omega_0 t}$$

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$$

$$\Delta \dot{U} = R_л \dot{I} + j\omega_0 L_л \dot{I}$$

$$\underline{z}_л = \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{I}}$$

**Метод для синхровекторов**

$$\Delta u(t) \to \Delta \dot{U}(t) e^{j\omega_0 t},\ i(t) \to \dot{I}(t) e^{j\omega_0 t}$$

$$\Delta \dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)$$

$$\Delta \dot{U}(t) = \underline{z}_л \dot{I}(t) + L_л \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$$

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ

| Вариант 1 | Вариант 2 |
|---|---|
| $\hat{\underline{z}}_0(t) = \dfrac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}(t)} = R_0(t) + jX_0(t)$<br>$\hat{L}_{л1}(t) = \dfrac{X_0(t)}{\omega_0 + \mathrm{Im}\left(\dfrac{\dot{I}'(t)}{\dot{I}(t)}\right)}$, $\hat{R}_{л1}(t) = R_0(t) - \hat{L}_{л1}(t)\mathrm{Re}\left(\dfrac{\dot{I}'(t)}{\dot{I}(t)}\right)$ | $\hat{\underline{z}}_{л1}(t) = \dfrac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \underline{k} \cdot \dot{I}'(t)}$<br>где $\dot{I}'(t) = \dfrac{d\dot{I}(t)}{dt}$, $\underline{k} = \dfrac{L_{уд}}{\underline{z}_{уд}}$ |

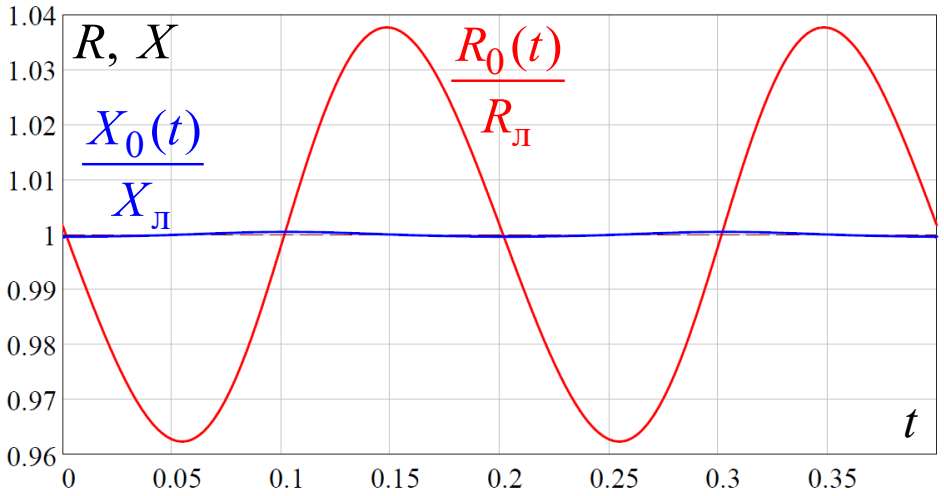
$$\rho(t) = \frac{\dot{I}'(t)}{\dot{I}(t)} = \gamma(t) + j\Delta\omega(t)$$

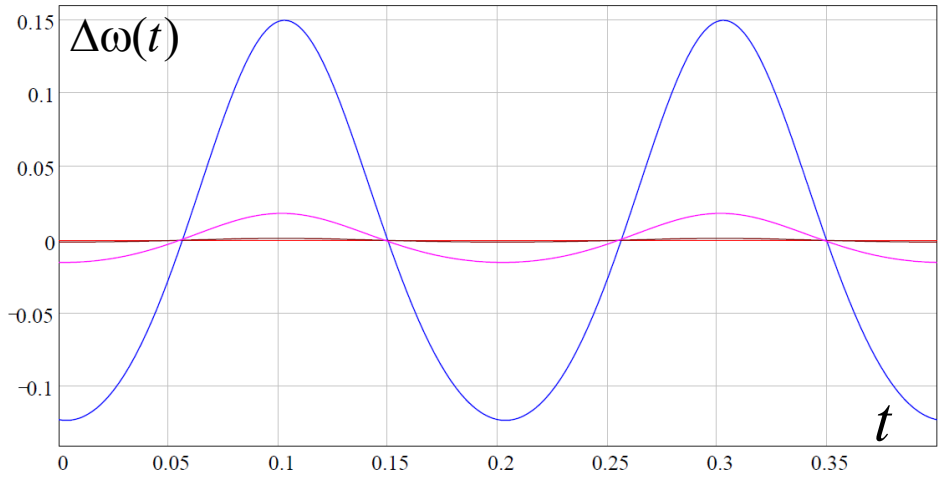
$$\underline{z}_0(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}(t)} = \underline{z}_{л1}\left(1 + \frac{\gamma(t) + j\Delta\omega(t)}{\beta_л + j\omega_0}\right)$$

| Вариант 1 | Вариант 2 |
|---|---|
| $\hat{\underline{z}}_0(t) = \dfrac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}(t)} = R_0(t) + jX_0(t)$<br>$\hat{X}_{л1}(t) = \dfrac{\omega_0}{\omega_0 + \Delta\omega(t)} X_0(t)$, $\hat{R}_{л1}(t) = R_0(t) - \dfrac{\gamma(t)}{\omega_0 + \Delta\omega(t)} X_0(t)$ | $\hat{\underline{z}}_{л1}(t) = \underline{z}_0(t) \dfrac{p_0}{p_0 + \rho(t)}$,<br>$p_0 = \beta_л + j\omega_0$,<br>$\beta_л = \dfrac{R_л}{L_л}$ |

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ

Графики оценки относительных значений активного и реактивного сопротивлений линии и комплексной частоты при амплитудной модуляции



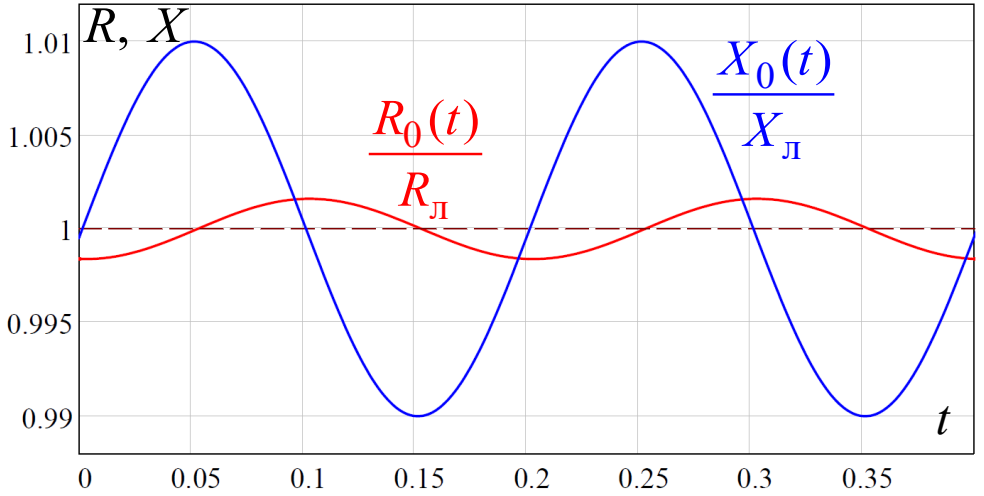

$\dot{E}(t)$

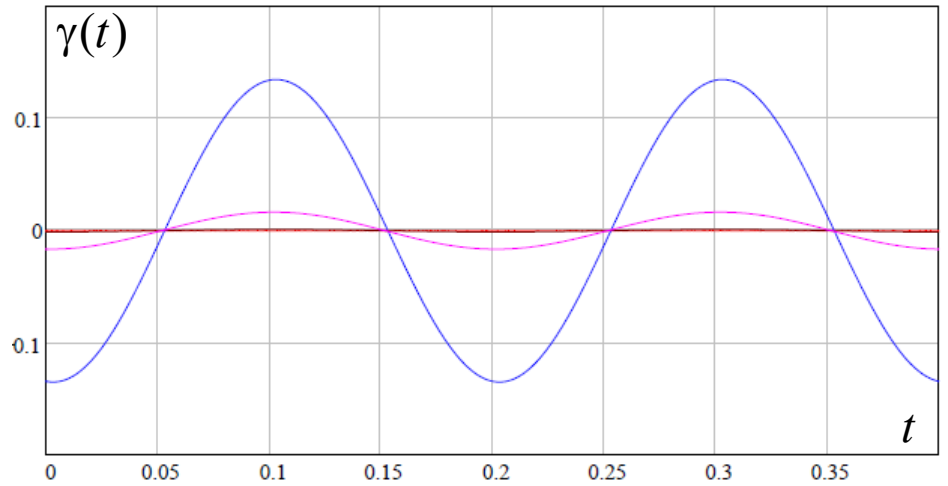
$\dot{U}_1(t)$

$\dot{U}_2(t)$

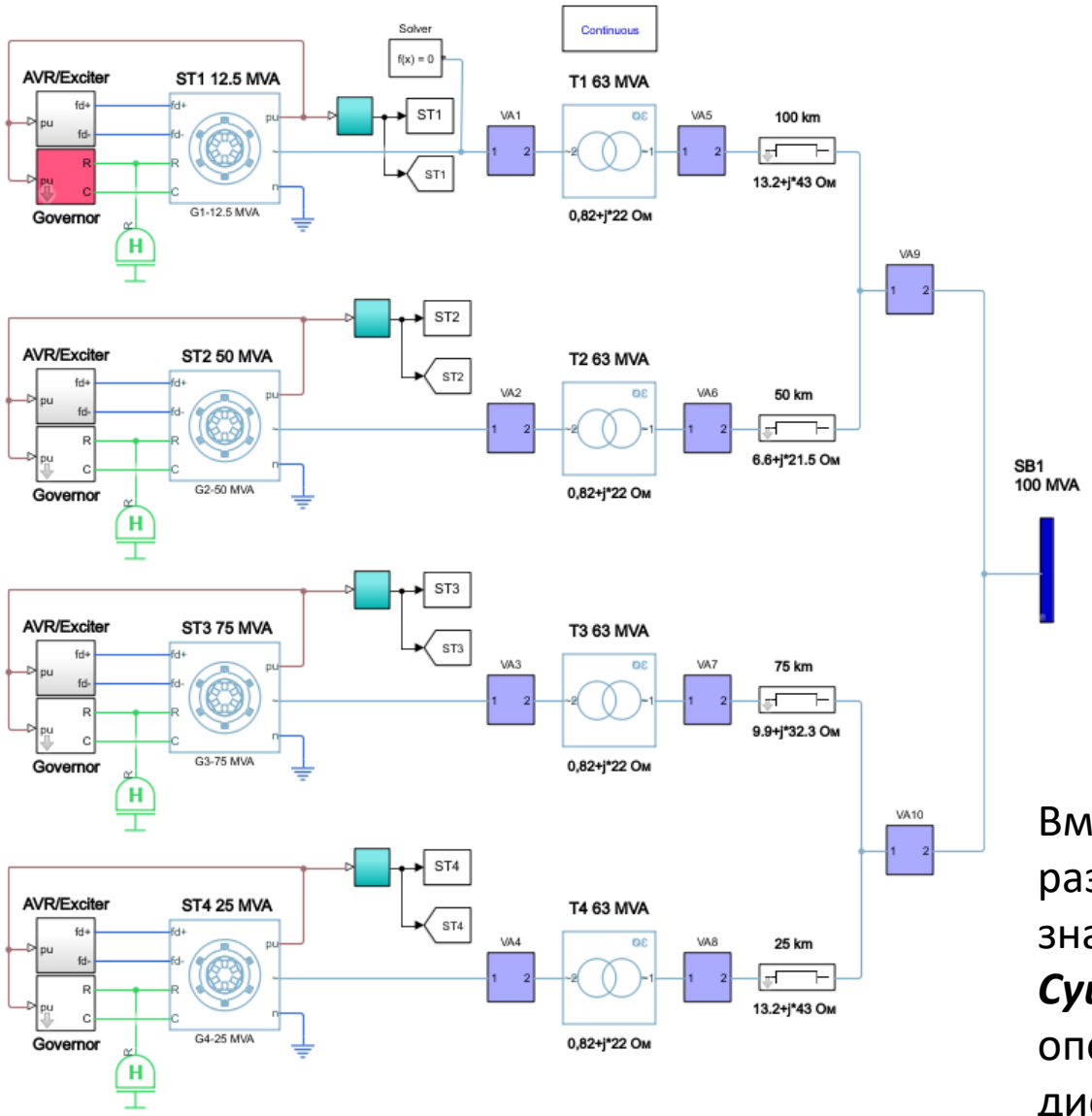
$\dot{I}(t)$

Графики оценки относительных значений активного и реактивного сопротивлений линии и комплексной частоты при фазовой модуляции

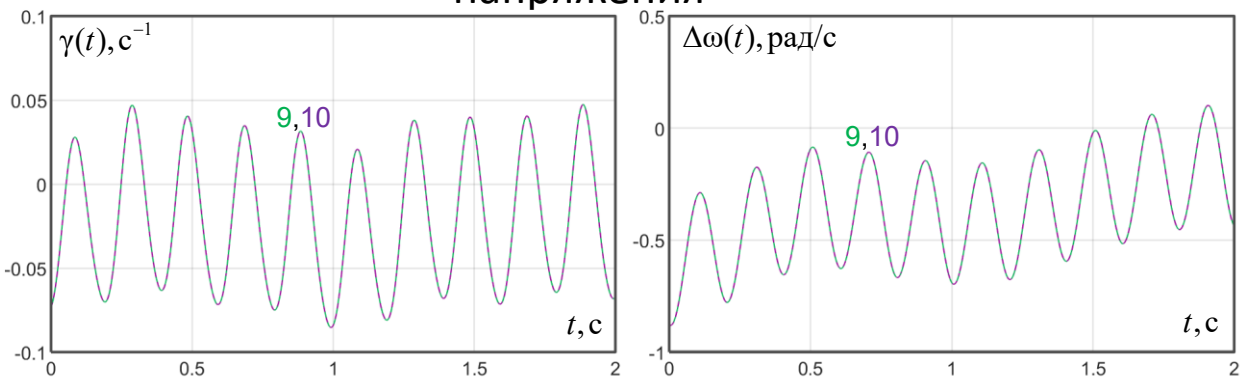


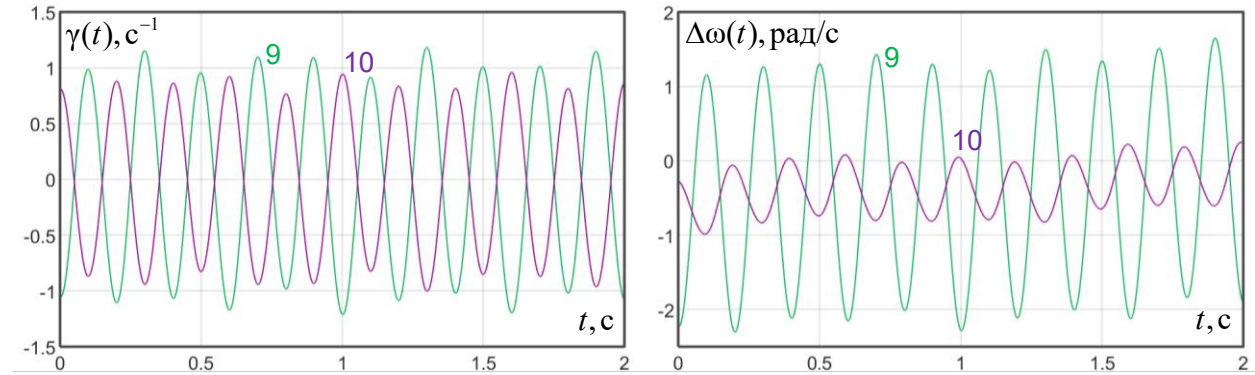
# ПОИСК ИСТОЧНИКА НЧК




напряжения




токи

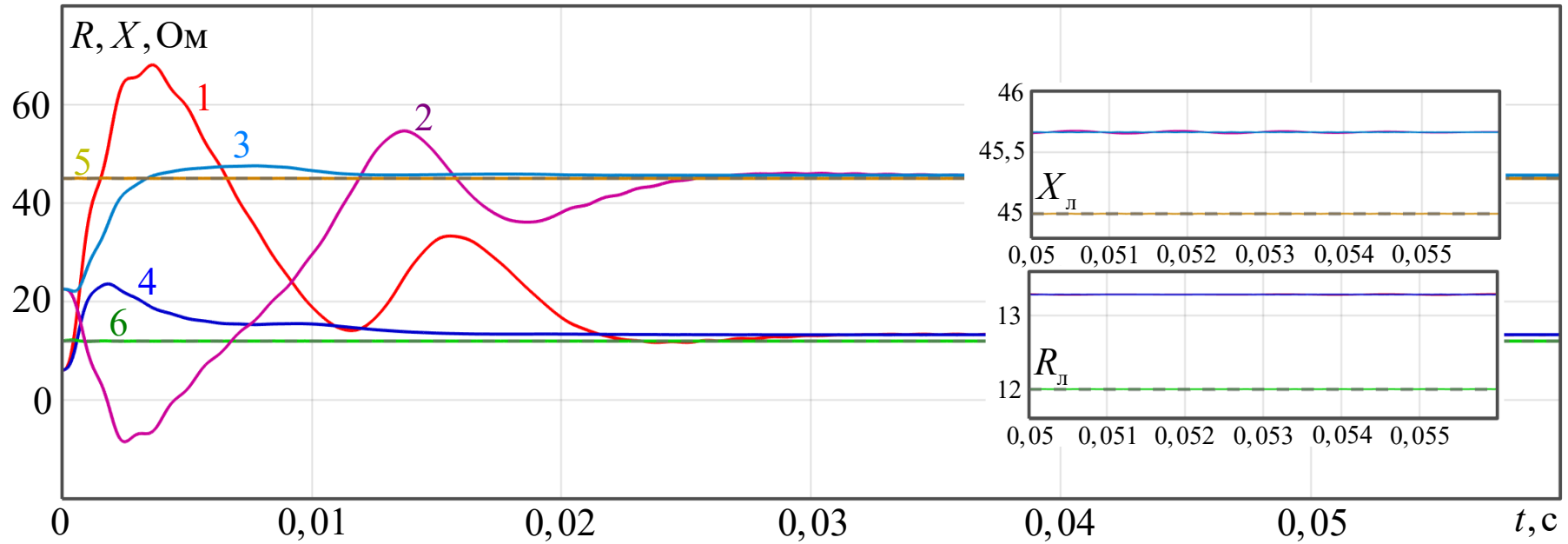



Вместо контроля и сравнения синхровекторов напряжения на разных подстанциях достаточно найти направление поиска по значению мгновенной частоты моды тока на присоединении ПС.
***Существующие ограничения***: согласно требований Системного оператора данные о синхровекторах тока не всегда передаются в диспетчерские центры.

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ (П-образная схема замещения)

Вариант 1

$$\hat{\underline{z}}(t) = \frac{\Delta\dot{U}(t)}{\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}_1'(t) - C\left(\underline{k}\dot{U}_1''(t) + \left(1 + j\underline{k}\omega_0\right)\dot{U}_1'(t) + j\omega_0\dot{U}_1(t)\right)}$$




1,2 - традиционный алгоритм (RL),

3,4 - новый алгоритм (RL),

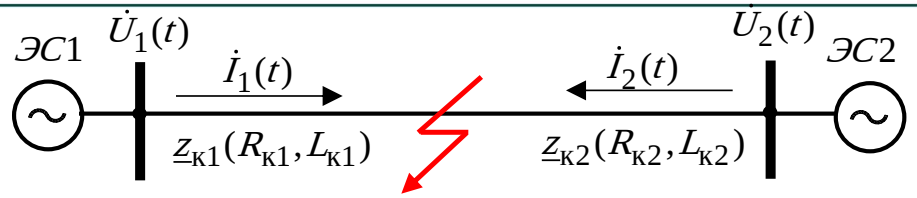
5,6 - новый алгоритм (RLC)

Вариант 2

$$\hat{C}(t) = \frac{\Delta\dot{I}(t)}{\Delta\dot{U}(t)} \frac{2}{\rho_\Delta(t) + j\omega_0}$$

где $\Delta\dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) - \dot{I}_2(t)$, $\Delta\dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)$, $\rho_\Delta(t) = \frac{\Delta\dot{U}_1'(t)}{\Delta\dot{U}_1(t)}$

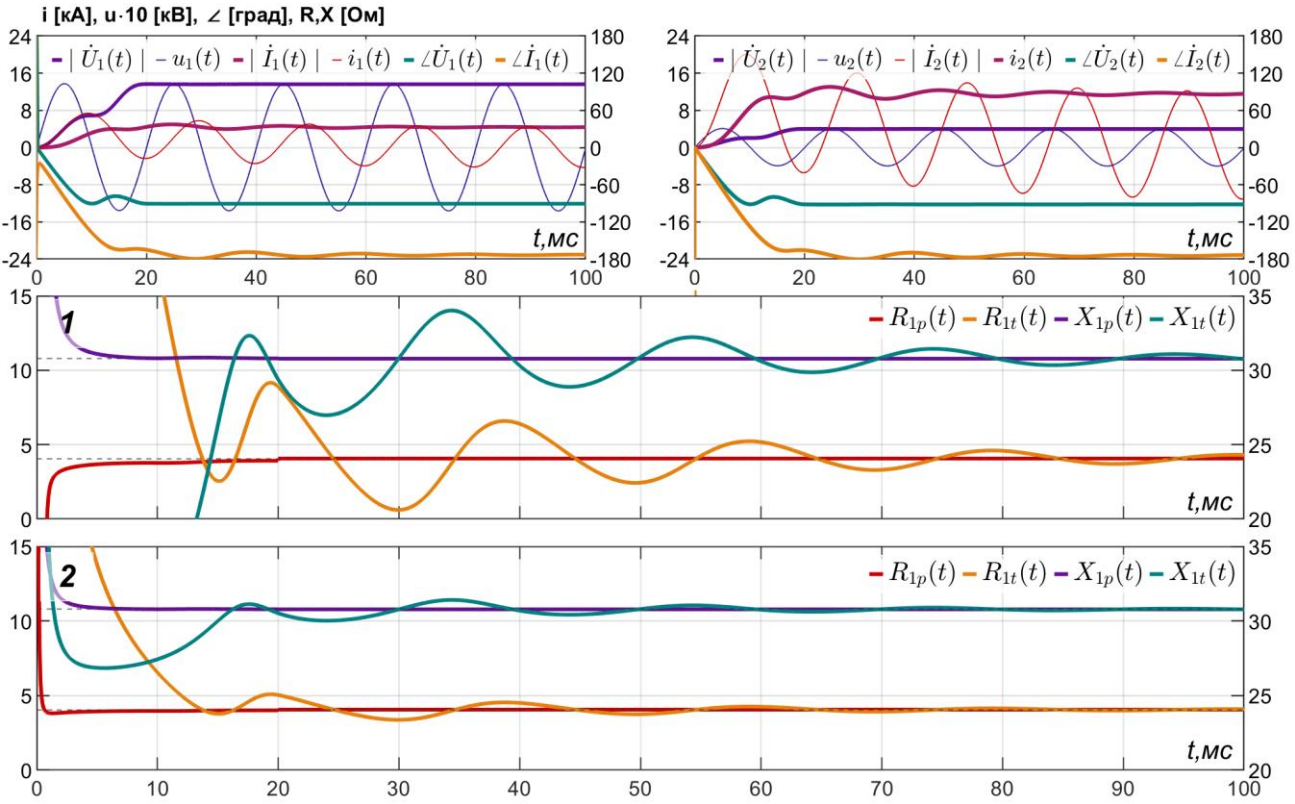
# ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ




| Наименование | Вариант 1 | Вариант 2 |
|---|---|---|
| Односторонняя оценка $\hat{\underline{z}}_{1k}(t)$ | $\hat{\underline{z}}_0(t) = \dfrac{\dot{U}_1(t)}{\dot{I}_1(t)}$, $\hat{\underline{z}}_0(t) = R_0(t) + jX_0(t)$<br>$\hat{L}_{к1}(t) = \dfrac{X_0(t)}{\omega_0 + \Delta\omega(t)}$,<br>$\hat{R}_{к1}(t) = R_0(t) - \gamma(t)\hat{L}_{к1}(t)$ | $\hat{\underline{z}}_{к1}(t) = \underline{z}_0(t)\dfrac{p_0}{p_0 + \rho(t)}$ |
| Двухсторонняя оценка $\hat{\underline{z}}_{1k}(t)$ | $\hat{\underline{z}}_0(t) = \dfrac{\Delta\dot{U}(t) + \underline{z}_л\dot{I}_2(t) + L_л\dot{I}_2'(t)}{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)}$,<br>$\hat{L}_{к1}(t) = \dfrac{X_0(t)}{\omega_0 + \Delta\omega(t)}$,<br>$\hat{R}_{к1}(t) = R_0(t) - \gamma(t)\hat{L}_{к1}(t)$ | $\hat{\underline{z}}_{к1}(t) = \underline{z}_0(t)\dfrac{p_0}{p_0 + \rho(t)}$<br>$\Delta\dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)$,<br>$\dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)$ |

# ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ

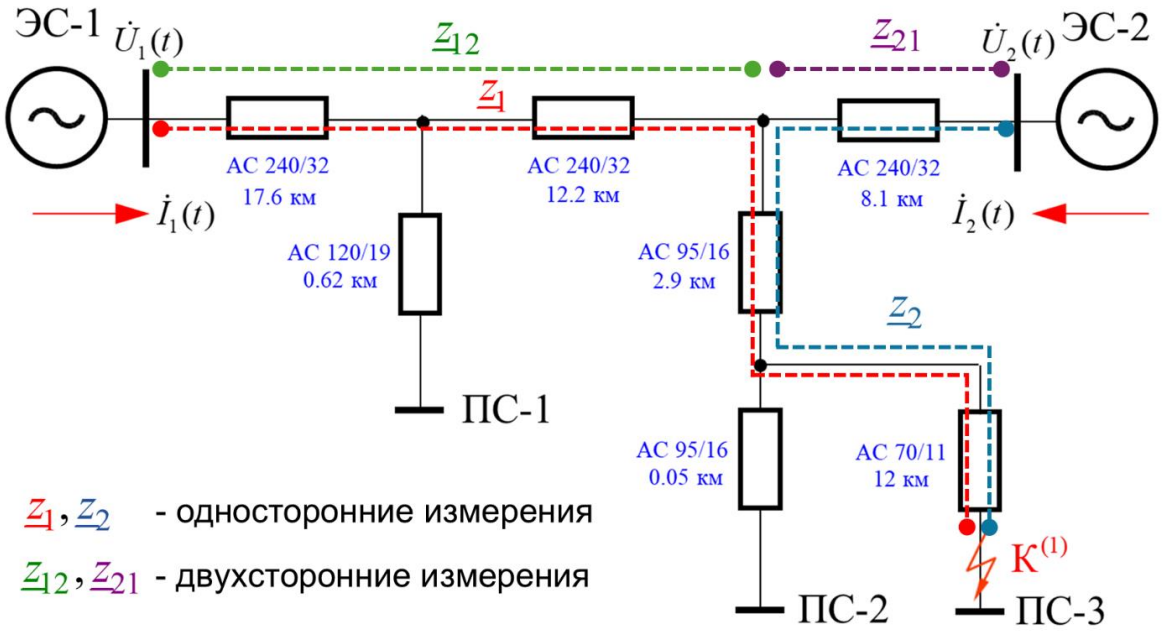
**Оценка *R*, *X* при односторонней (1) и при двухсторонней (2) оценке сопротивления**



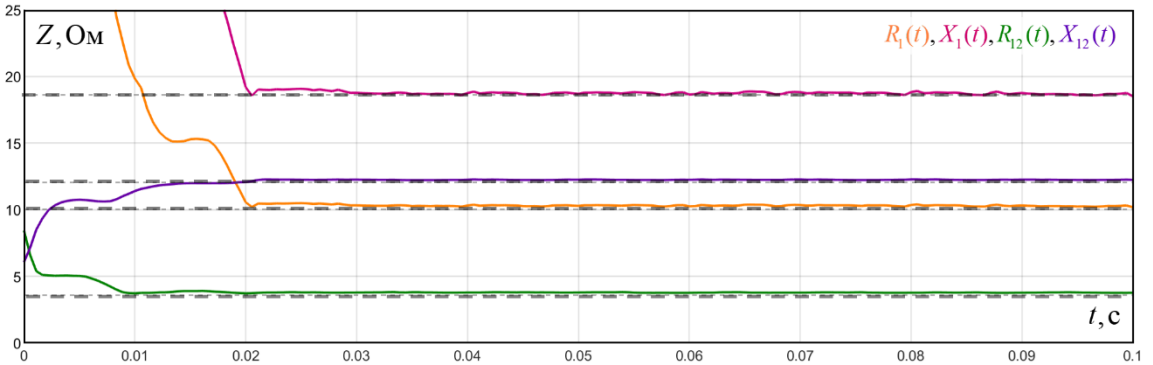

$R_{1p}(t), X_{1p}(t)$ - новый алгоритм,

$R_{1t}(t), X_{1t}(t)$ - традиционный алгоритм

**Тестирование на основе данных РАС**



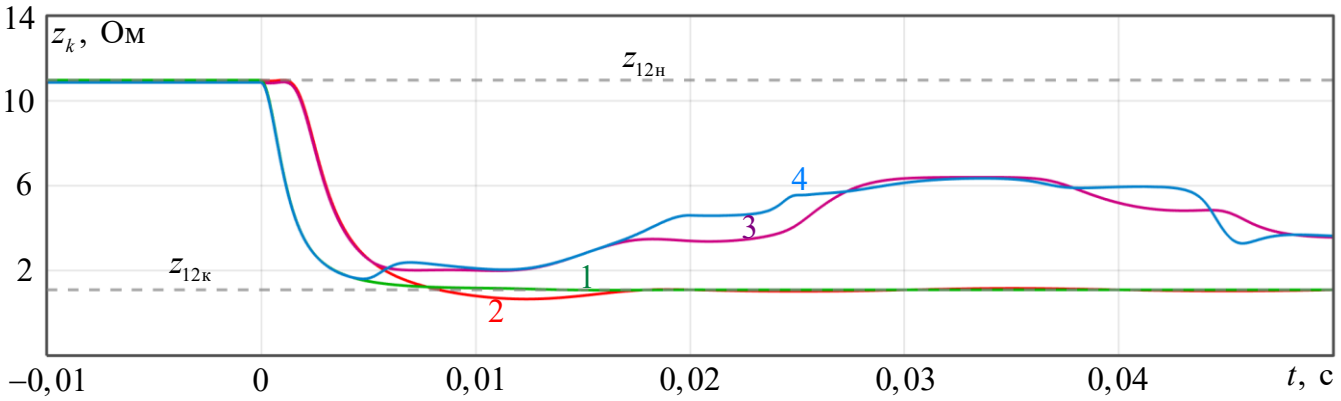

Оценка сопротивления петли КЗ



# РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

| | |
|---|---|
| Дифференциальный принцип защиты | - оценка дифференциального тока СТ;<br>- дополнительный критерий для блокировки защиты при БНТ, дифференциально-фазный принцип, высокое быстродействие;<br>- снижение тока небаланса. |
| Дистанционный принцип защиты | - оценка сопротивления при внутреннем КЗ;<br>- высокое быстродействие и точность при э/м процессах. |

## Оценка модуля сопротивления при КЗ в трансформаторе



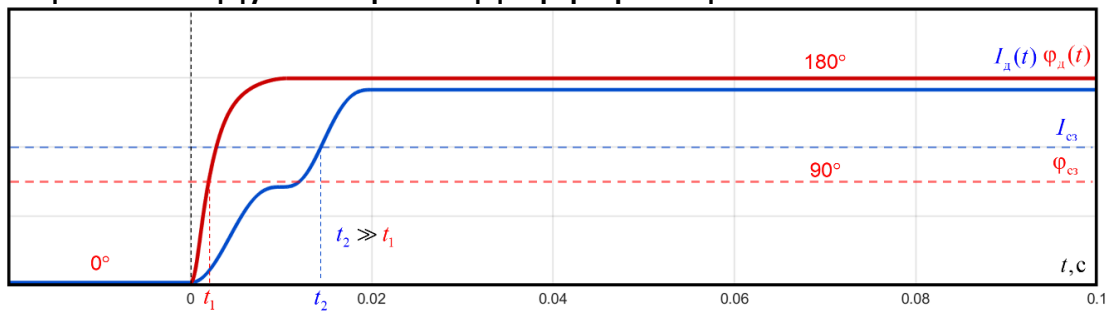

1 - цифровые измерительные трансформаторы и новый алгоритм,

2 - цифровые измерительные трансформаторы и традиционный алгоритм,

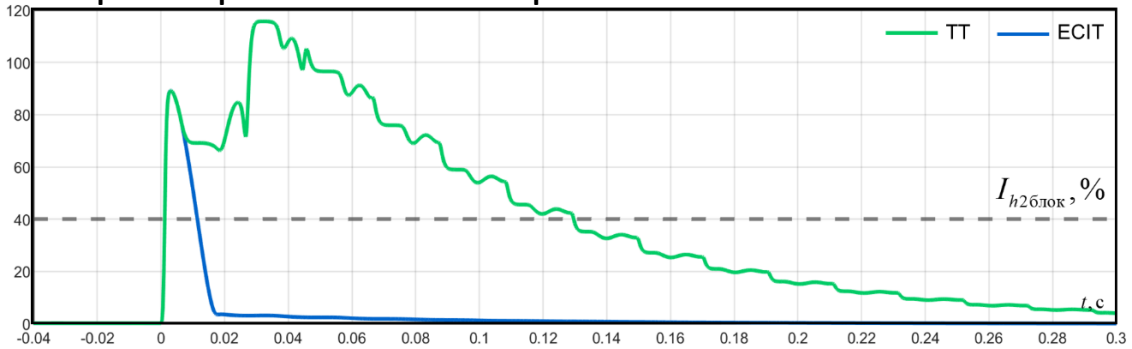
3 - электромагнитные измерительные трансформаторы и традиционный алгоритм,

4 - электромагнитные измерительные трансформаторы и новый алгоритм,

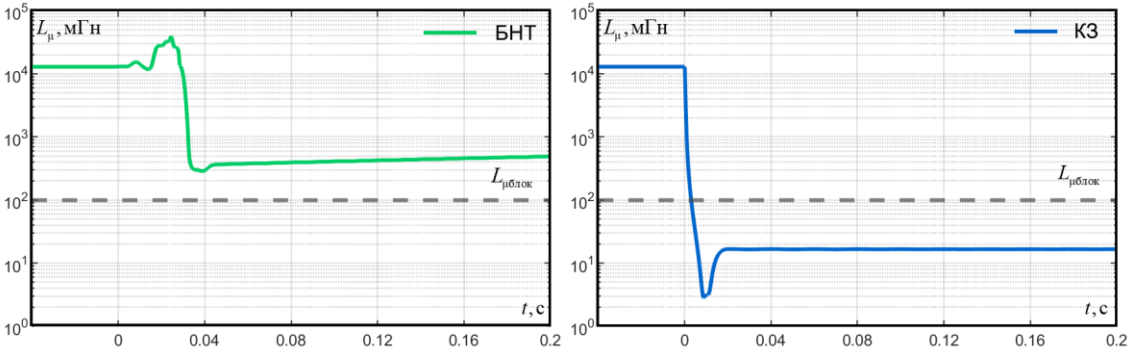
## Оценка модуля и фазы дифференциального тока



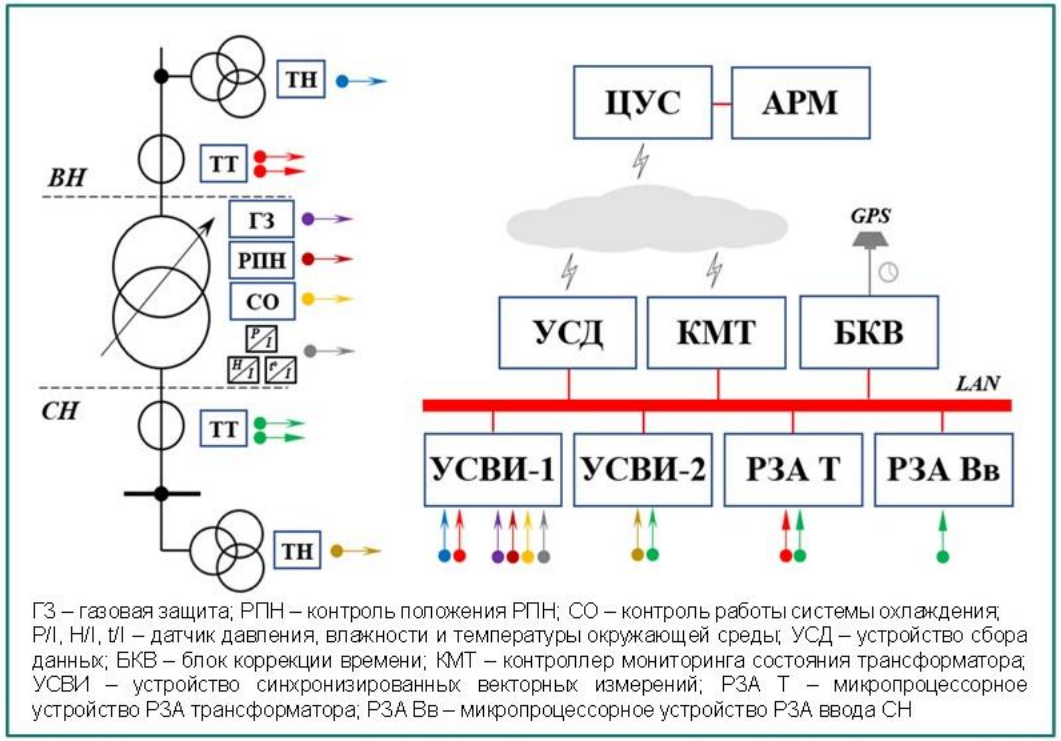

## Вторая гармоника тока при БНТ




## Оценка индуктивности намагничивания



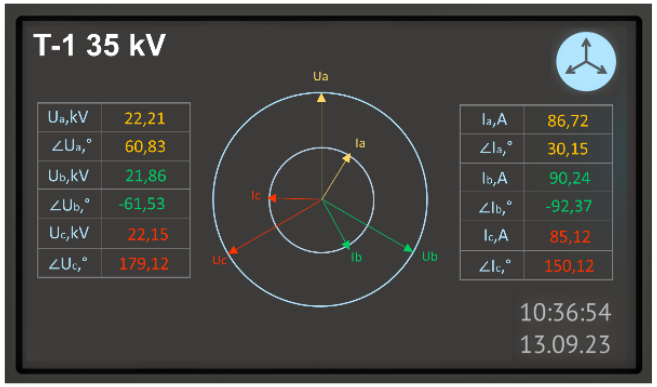
# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ



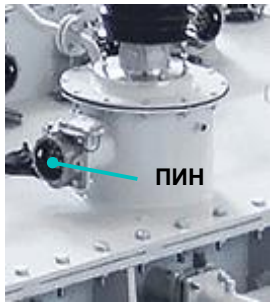

ГЗ – газовая защита; РПН – контроль положения РПН; СО – контроль работы системы охлаждения; P/I, H/I, t/I – датчик давления, влажности и температуры окружающей среды; УСД – устройство сбора данных; БКВ – блок коррекции времени; КМТ – контроллер мониторинга состояния трансформатора; УСВИ – устройство синхронизированных векторных измерений; РЗА Т – микропроцессорное устройство РЗА трансформатора; РЗА Вв – микропроцессорное устройство РЗА ввода СН

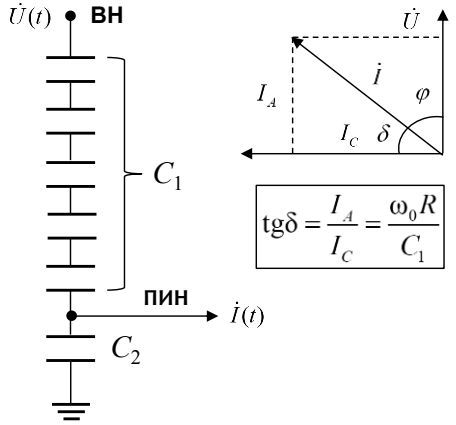
**Выявление дефектов силового трансформатора**

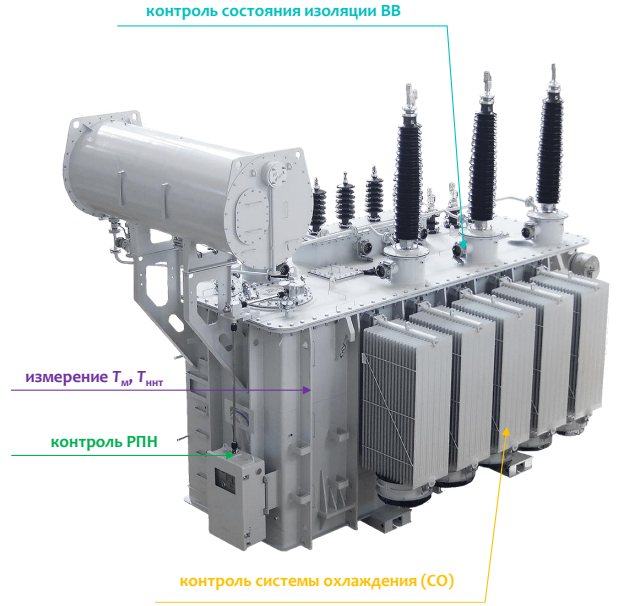
| Механизм повреждения | Виды дефектов | Параметр |
|---|---|---|
| Электромагнитные силы, вызванные током КЗ | Деформация обмотки | $\mathrm{Im}[\hat{\underline{z}}_{12}(t)]$ |
| Повреждение изоляции обмоток | Межвитковое замыкание, замыкание параллельных проводников | $\mathrm{Re}[\hat{\underline{z}}_{12}(t)]$, $\hat{L}_{\mu}(t)$ |
| Ухудшенный контакт и перегрев контактов отводов РПН или ПБВ | Перегрев и эрозия контактов | $\mathrm{Re}[\hat{\underline{z}}_{12}(t)]$ |
| Механическое смещение или перегрев проводника | Обрыв цепи | $\hat{L}_{\mu}(t)$ |
| Механическое воздействие перевозбуждение магнитопровода | Увеличение потерь, пожар в стали | $\hat{L}_{\mu}(t)$, $\hat{I}_{\mu}(t)$ |




**Контроль состояния изоляции высоковольтного ввода**

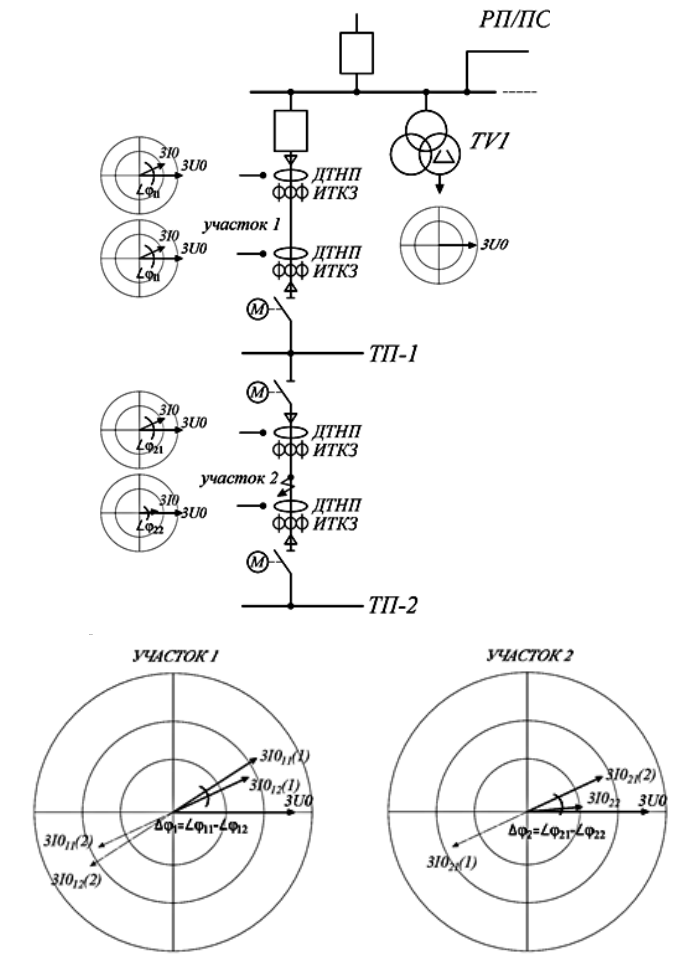


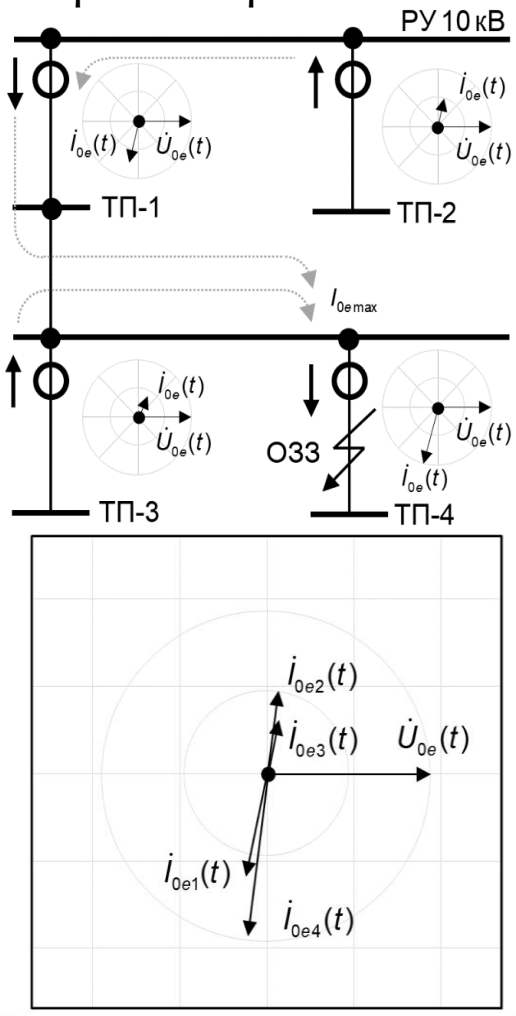



# ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОЗЗ

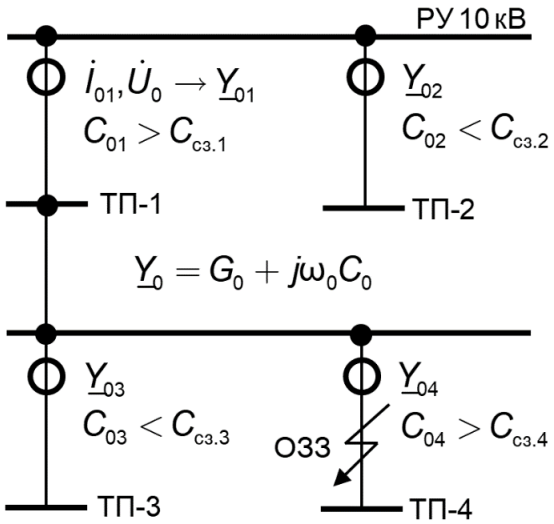
1. Защита при использовании синхровекторов тока и напряжения НП

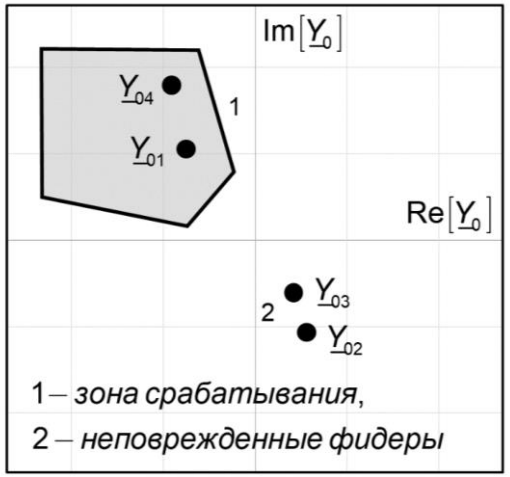



2. Направленная защита НП при использовании эквивалентных синхровекторов ВГ

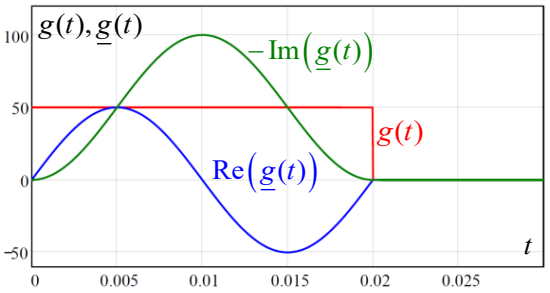


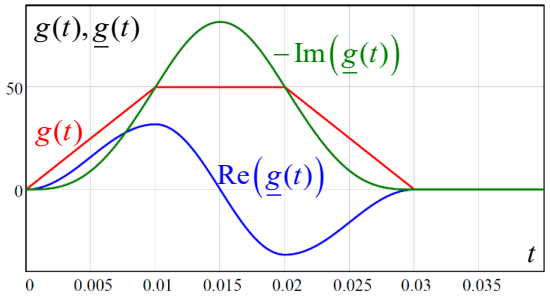

3. Адмитансный принцип выполнения защиты от ОЗЗ

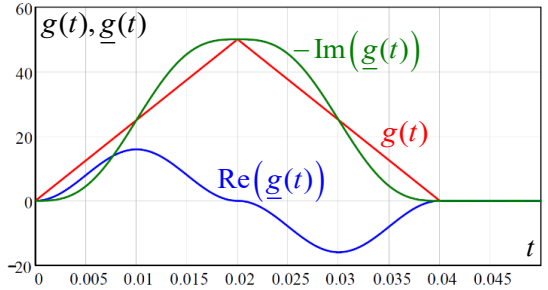


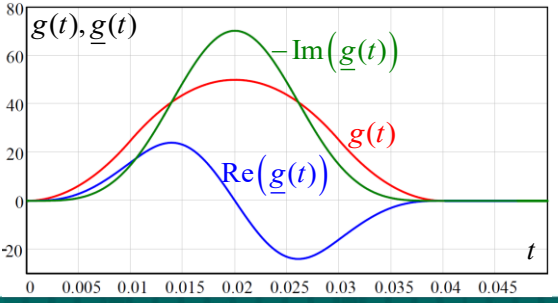



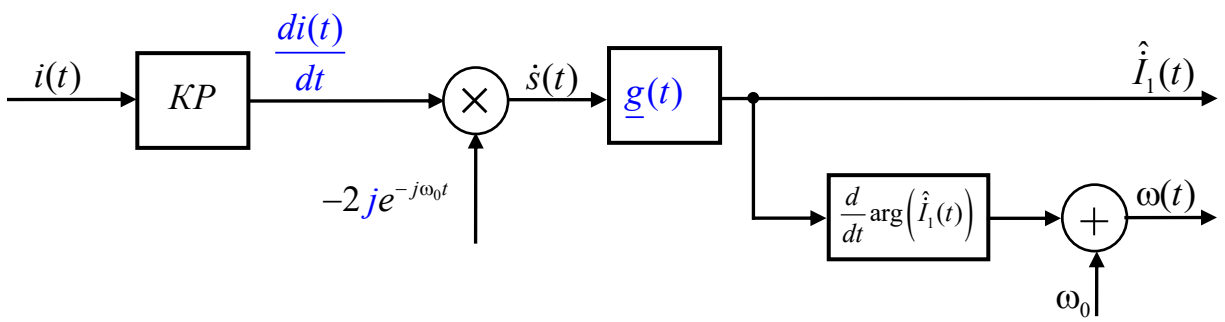
# СИНТЕЗ ФИЛЬТРОВ

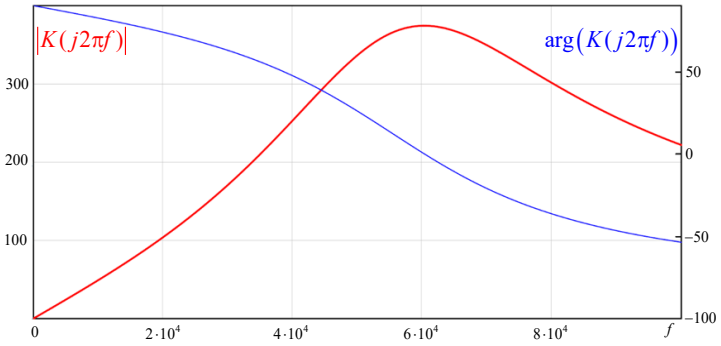


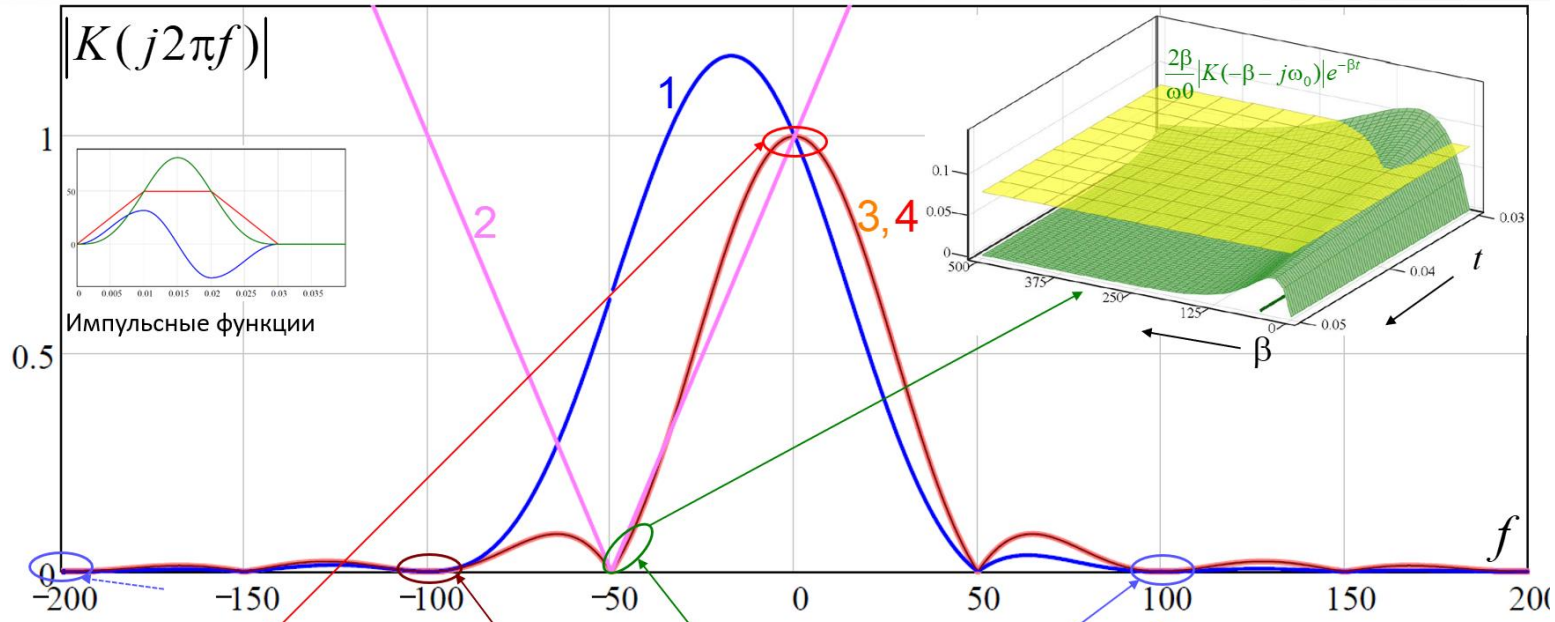




$$\dot{s}(t) = \dot{X}_1 \frac{\omega_1}{\omega_0} e^{j(\omega_1-\omega_0)t} - \bar{\dot{X}}_1 \frac{\omega_1}{\omega_0} e^{-j(\omega_1+\omega_0)t} - 2j\frac{\beta}{\omega_0} X_0 e^{-(\beta+j\omega_0)t} + \dot{X}_3 \frac{3\omega_1}{\omega_0} e^{j(3\omega_1-\omega_0)t} - \bar{\dot{X}}_3 \frac{3\omega_1}{\omega_0} e^{-j(3\omega_1+\omega_0)t}$$

1 АЧХ фильтра с комплексной импульсной функцией, полученного от фильтра с трапецеидальной ИХ

2 смещенная АЧХ катушки Роговского

3 АЧХ фильтра с трапецеидальной ИХ

# СИНТЕЗ ФИЛЬТРОВ

Импульсная функция фильтра

$$\underline{g}_i(t) = \dot{G}_i e^{\rho_i t} - \dot{G}_i e^{\rho_i T_i} e^{-\rho_i (t - T_i)}$$

$$\rho_i = -\alpha_i + jw_i$$

Передаточная функция фильтра

$$\underline{K}_i(p) = \frac{\dot{G}_i}{p - \rho_i}\left(1 - e^{-(p-\rho_i)T_i}\right)$$

Параллельное соединение

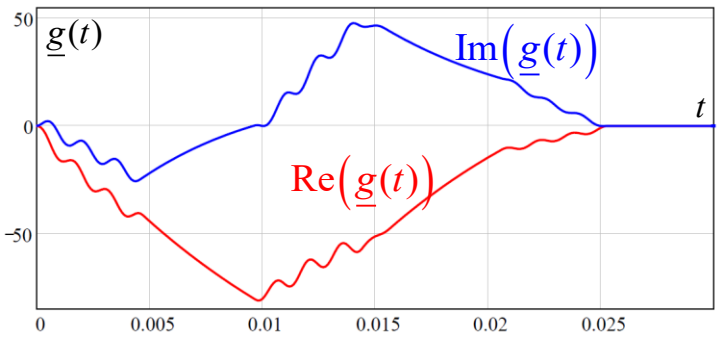
$$\underline{K}(p) = \sum_{i=1}^{3} \underline{K}_i(p)$$

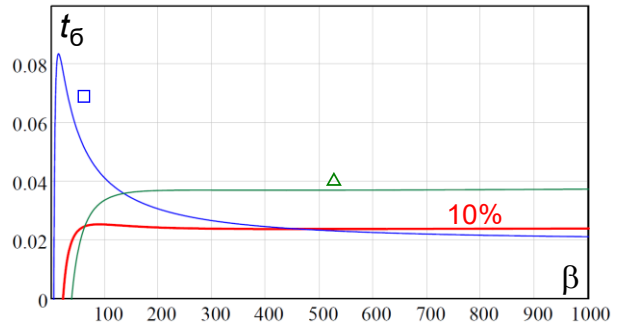
Последовательное

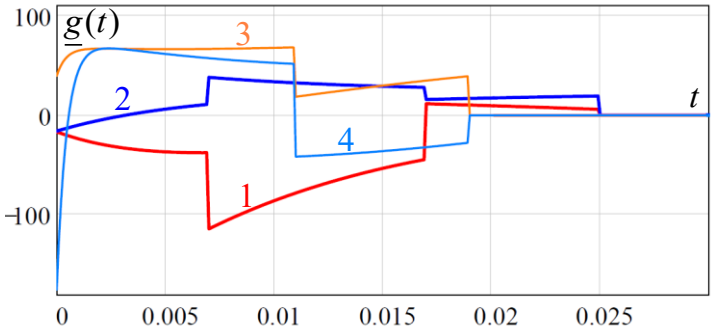
$$\underline{K}(p) = \prod_{i=1}^{3} \underline{K}_i(p)$$

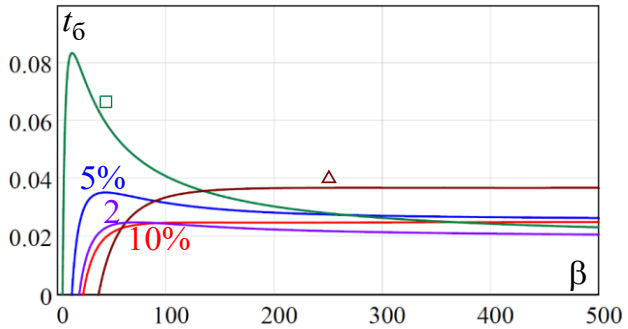
Смешанное

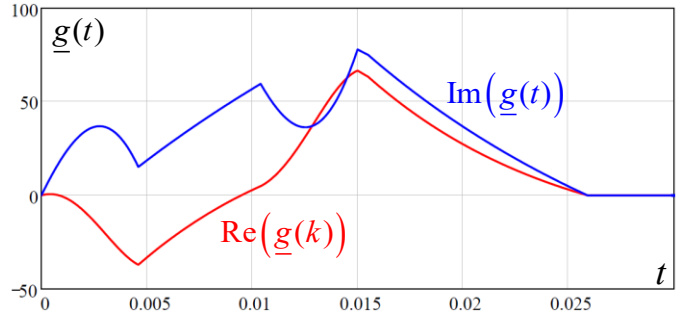
$$\underline{K}(p) = \left(\underline{K}_1(p) + \underline{K}_2(p)\right)\underline{K}_3(p)$$

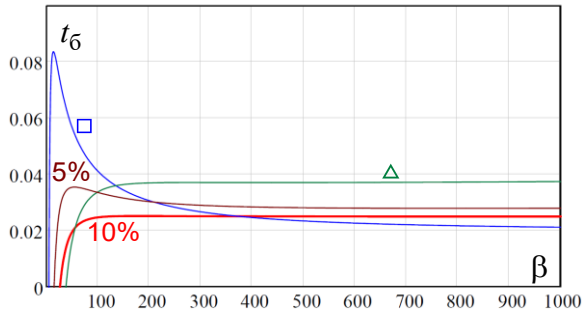


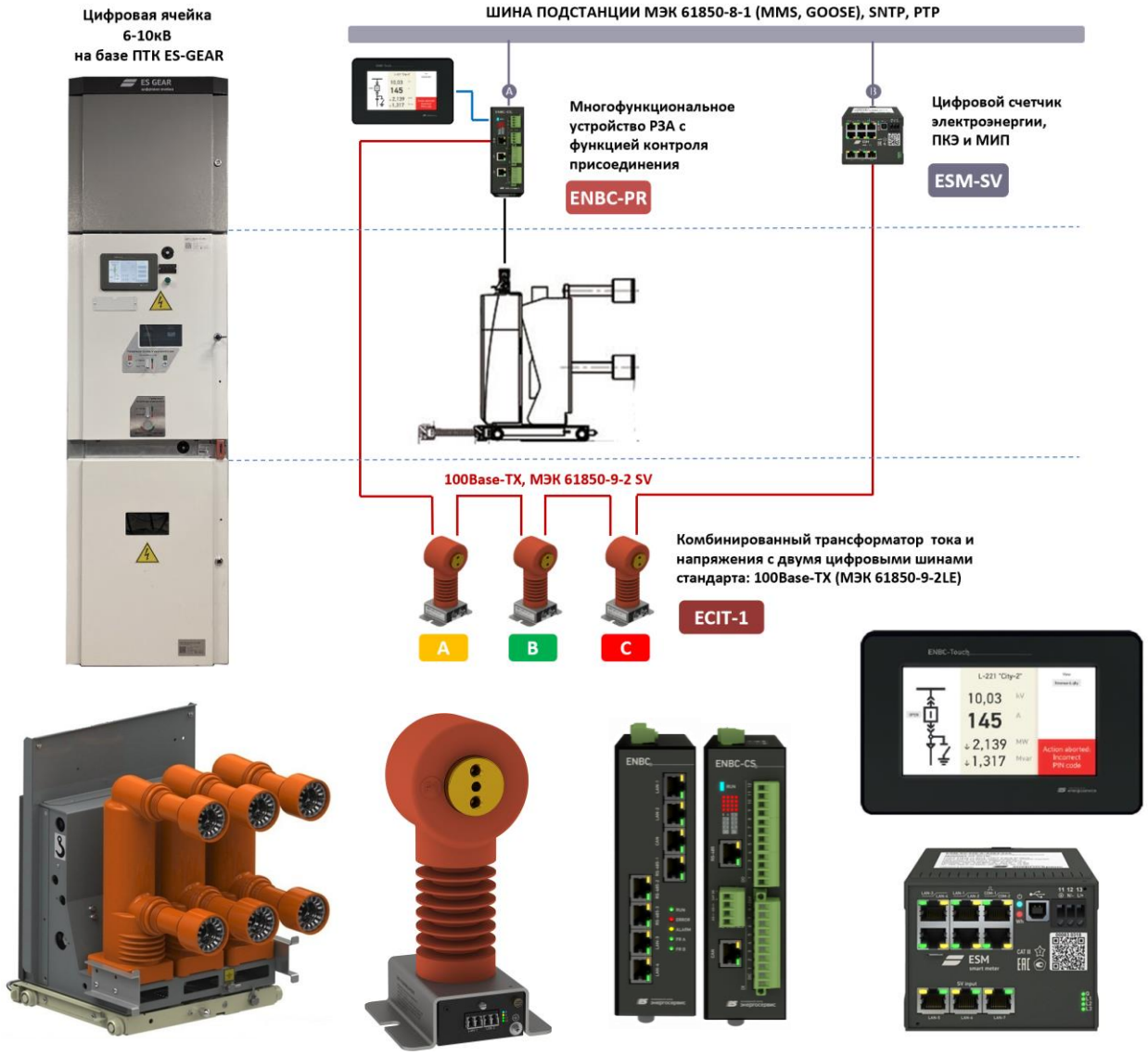



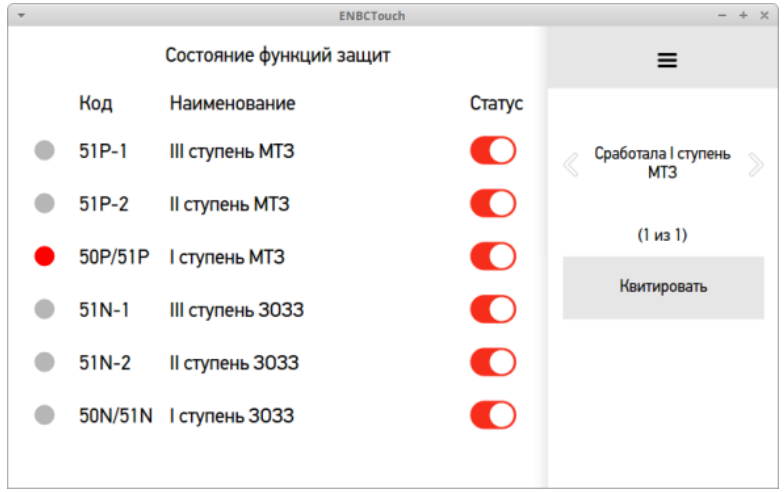



# ЦИФРОВАЯ ЯЧЕЙКА





# СИНХРОВЕКТОРЫ

| № | Синхровекторы | Применение |
|---|---|---|
| 1 | синхровекторы напряжения и тока, мгновенная частота<br>+ комплексные мгновенные частоты тока и напряжения | СМПР, СМЗУ, АСДУ, АСУ ТП<br>РЗА, ПА, ЦСПА<br>мониторинг состояния электрооборудования |
| 2 | синхровекторы напряжения и тока высших гармоник | СМПР, АСДУ, АСУ ТП<br>РЗА<br>мониторинг состояния электрооборудования |
| 3 | эквивалентные синхровекторы напряжения и тока | АСДУ, АСУ ТП |
| 4 | эквивалентные синхровекторы напряжения и тока высших гармоник | АСДУ, АСУ ТП<br>РЗА<br>мониторинг состояния электрооборудования |
| 5 | эквивалентные синхровекторы напряжения и тока высших гармоник токов и напряжений нулевой последовательности | защита от однофазных замыканий на землю |

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!


**Контакты**

**Мокеев Алекей Владимирович**

**a.mokeev@ens.ru**