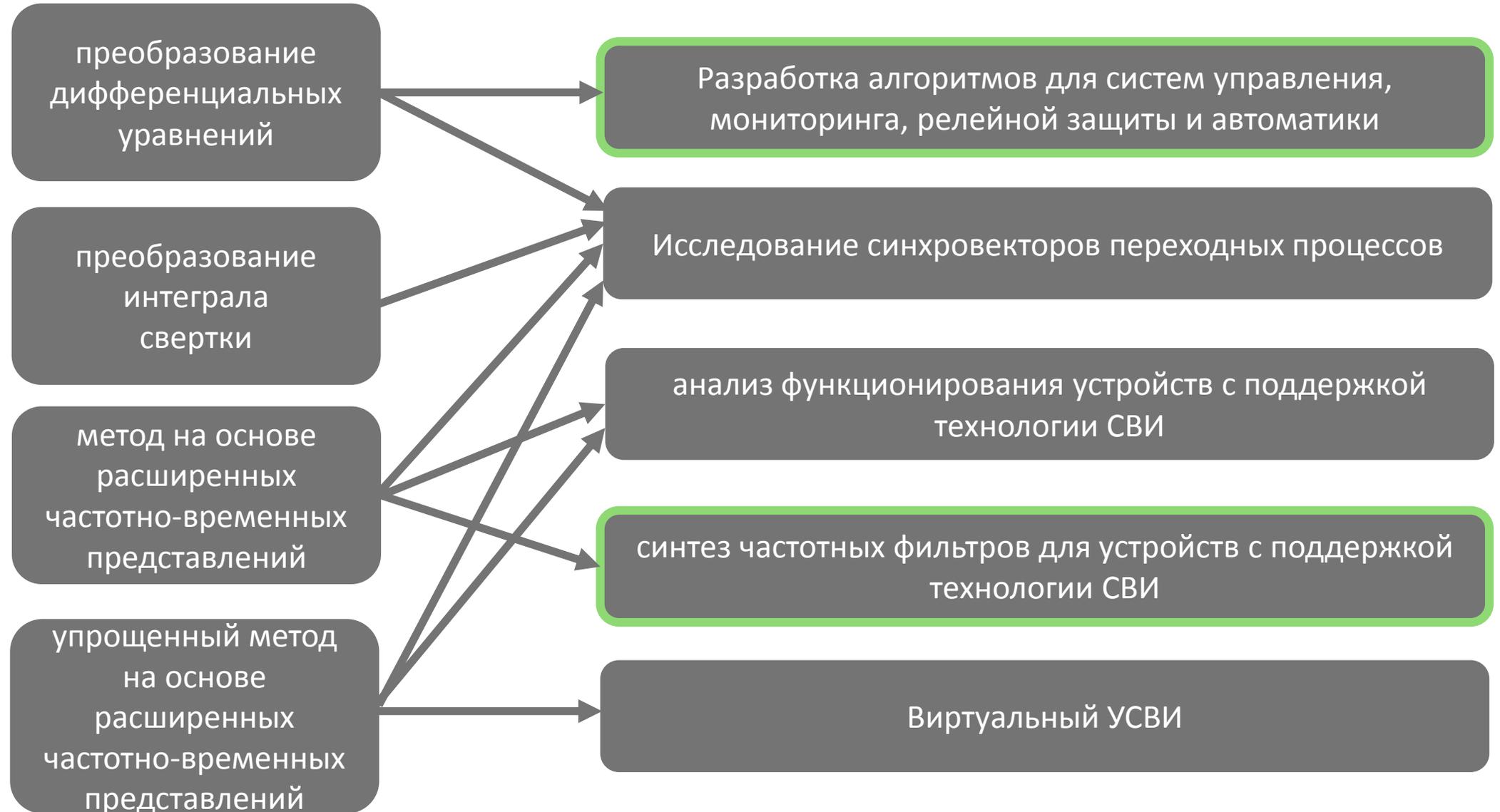


Практический опыт разработки, внедрения и эксплуатации систем защиты и мониторинга состояния силовых трансформаторов с применением данных СВИ

Мокеев А.В., д.т.н., Пискунов С.А., Ульянов Д.Н.

*ООО «Инженерный центр «Энергосервис»,
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
Архангельск
a.mokeev@ens.ru*



$$\dot{I} \rightarrow \dot{I}(t), \dot{U} \rightarrow \dot{U}(t), \dot{E} \rightarrow \dot{E}(t)$$

Задан синхровекторы ЭДС $\dot{E}_1(t)$ и $\dot{E}_2(t)$.
 Определить синхровектор $\dot{I}_1(t)$



№	Метод	Выражения
1	Декомпозиция ЭДС	$\Delta e(t) = e_1(t) - e_2(t), \Delta e(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{E}}^T e^{pt}), \dot{\mathbf{E}} = [\dot{E}_n]_N = [E_{m_n} e^{-j\omega_n}]_N, \mathbf{p} = [-\beta_n + j\omega_n]_N$ $\dot{\mathbf{I}}_1(t) = \dot{\mathbf{E}} \circ Y(\mathbf{p}, t), \dot{\mathbf{I}}_{1r} = \dot{\mathbf{E}} \circ Y_0(\mathbf{p}), \dot{\mathbf{I}}_{1f}(t) = \dot{\mathbf{E}} \circ Y_1(\mathbf{p}, t),$ $Y(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau, Y(p, t) = Y_0(p) + Y_1(p, t), g(t) \Leftrightarrow Y_0(p) = \frac{1}{R_{\Sigma} + pL_{\Sigma}}$
2	Частотно-временной подход	$\dot{I}_1(t) = \Delta \dot{E}(t) Y_0(j\omega_0) + \int_0^t Y_1(j\omega_0, \tau) d\Delta \dot{E}(t - \tau) + \Delta \dot{E}(0) Y_1(j\omega_0, t)$
3	Упрощенный частотно-временной подход	$\dot{I}_1(t) \approx \Delta \dot{E}(t) Y(j\omega(t), t), \dot{I}_{1r}(t) \approx \Delta \dot{E}(t) Y(j\omega(t)), \dot{I}_{1f}(t) \approx \Delta \dot{E}(0) Y_1(j\omega(t), t)$ <p>где $\omega(t)$ - мгновенная частота, рассчитываемая на основе $\Delta \dot{E}(t)$</p>
4	Решение дифференциального уравнения	$\dot{I}_1(t) = \frac{1}{L_{\Sigma}} \int_0^t \Delta \dot{E}(\tau) e^{p_1(t-\tau)} d\tau,$ $p_1 = \beta_1 + j\omega_0, \beta_1 = R_{\Sigma} / L_{\Sigma}, \omega_0 = 2\pi 50 \text{ рад/с}$
5	На основе интеграла свертки	$\dot{I}_1(t) = \frac{1}{L_{\Sigma}} \int_0^t \Delta \dot{E}(t - \tau) e^{-p_1\tau} d\tau$

o – операция умножения векторов

Заданы синхровекторы ЭДС $\dot{E}_1(t)$ и $\dot{E}_2(t)$,
 параметры линии и энергосистем.
 Определить синхровекторы $\dot{I}_1(t)$, $\dot{U}_1(t)$, $\dot{U}_2(t)$.



№	Наименование	Выражение
1	Дифференциальное уравнение	$\Delta e(t) = i(t)R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{di(t)}{dt}$, где $\Delta e(t) = e_1(t) - e_2(t)$ $R_{\Sigma} = R + R_{c1} + R_{c2}$, $L_{\Sigma} = L + L_{c1} + L_{c2}$
2	Подстановка	$i_1(t) \rightarrow \dot{I}_1(t)e^{j\omega_0 t}$, $\Delta e(t) \rightarrow \Delta \dot{E}(t)e^{j\omega_0 t} = (\dot{E}_1(t) - \dot{E}_2(t))e^{j\omega_0 t}$
3	Выражения с синхровекторами	$\Delta \dot{E}(t) = \underline{z}_{\Sigma} \dot{I}(t) + L_{\Sigma} \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$, $\underline{z}_{\Sigma} = R_{\Sigma} + j\omega_0 L_{\Sigma}$
4	Определение синхровектора тока	$\dot{I}_1(t) = \frac{1}{L_{\Sigma}} \int_0^t \Delta \dot{E}(\tau) e^{p_1(t-\tau)} d\tau$, $p_1 = \beta_1 + j\omega_0$, $\beta_1 = R_{\Sigma} / L_{\Sigma}$, $\omega_0 = 2\pi 50$ рад/с
5	Определение синхровектора напряжения $\dot{U}_1(t)$	$\dot{U}_1(t) = \dot{E}_1(t) - \underline{z}_{c1} \dot{I}_1(t) - L_{c1} \frac{d\dot{I}_1(t)}{dt}$
6	Определение синхровектора напряжения $\dot{U}_2(t)$	$\dot{U}_2(t) = \dot{U}_1(t) - \underline{z} \dot{I}_1(t) - L \frac{d\dot{I}_1(t)}{dt}$, $\underline{z} = R + j\omega_0 L$



Дифференциальное уравнение линии

$$\Delta u(t) = R_{\text{л}} i(t) + L_{\text{л}} \frac{di(t)}{dt}$$

Метод комплексных амплитуд

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

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

$$\Delta \dot{U} = R_{\text{л}} \dot{I} + j\omega_0 L_{\text{л}} \dot{I}$$

$$\underline{z}_{\text{л}} = \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{I}}$$

Метод для синхровекторов

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

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

$$\Delta \dot{U}(t) = \underline{z}_{\text{л}} \dot{I}(t) + L_{\text{л}} \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$$

Вариант 1

$$\hat{z}_0(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}(t)} = R_0(t) + jX_0(t)$$

$$\hat{L}_{\pi 1}(t) = \frac{X_0(t)}{\omega_0 + \text{Im}\left(\frac{\dot{I}'(t)}{\dot{I}(t)}\right)}, \quad \hat{R}_{\pi 1}(t) = R_0(t) - \hat{L}_{\pi 1}(t) \text{Re}\left(\frac{\dot{I}'(t)}{\dot{I}(t)}\right)$$

Вариант 2

$$\hat{z}_{\pi 1}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}(t) \left(1 + \underline{k} \frac{\dot{I}'(t)}{\dot{I}(t)}\right)}$$

где $\dot{I}'(t) = \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$, $\underline{k} = \frac{L_{y\pi}}{z_{y\pi}}$

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

$$z_0(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}(t)} = z_{\pi 1} \left(1 + \frac{\gamma(t) + j\Delta\omega(t)}{\beta_{\pi} + j\omega_0}\right)$$

Вариант 1

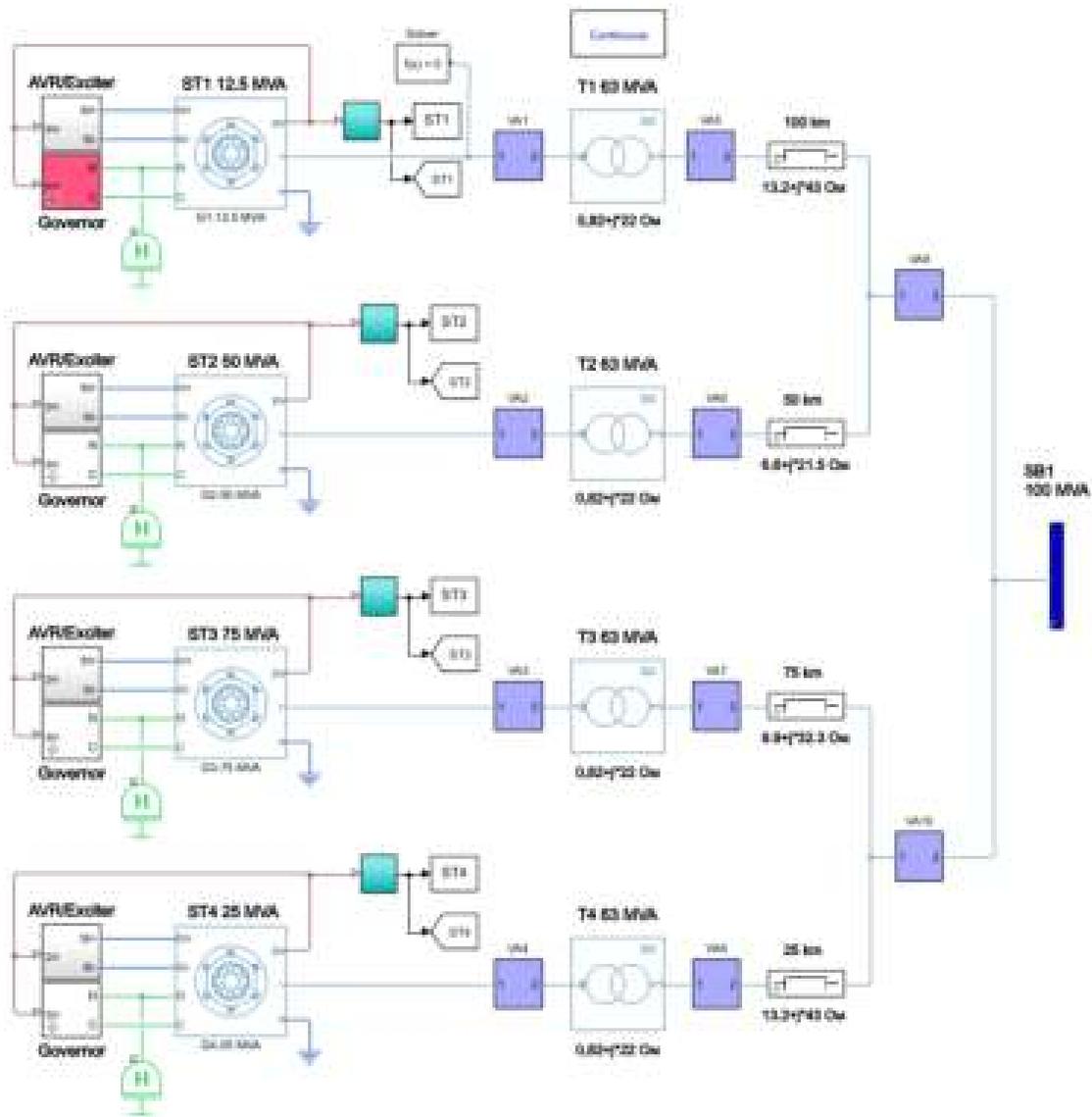
$$\hat{z}_0(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}(t)} = R_0(t) + j\omega_0 L_0(t)$$

$$\hat{L}_{\pi 1}(t) = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \Delta\omega(t)} L_0(t), \quad \hat{R}_{\pi 1}(t) = R_0(t) - \gamma(t) \hat{L}_{\pi 1}(t)$$

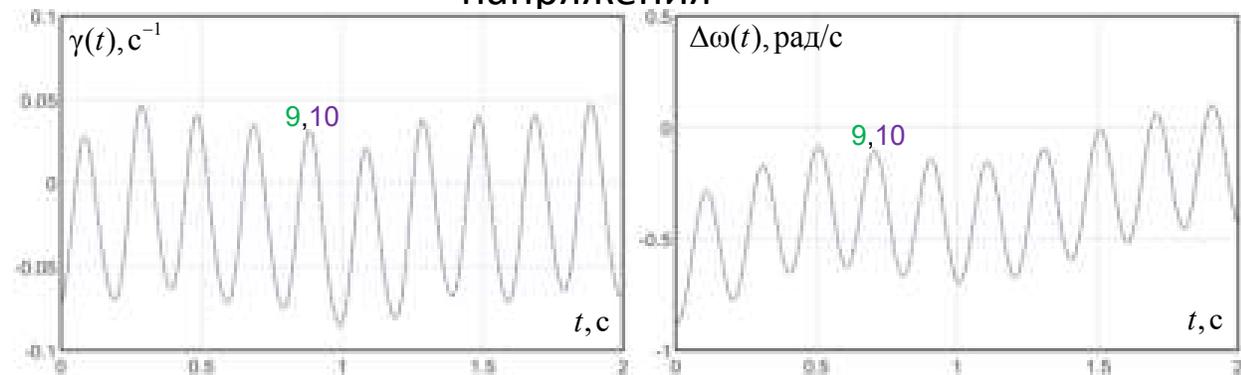
Вариант 2

$$\hat{z}_{\pi 1}(t) = z_0(t) \frac{1}{1 + \underline{k} \cdot \rho(t)}$$

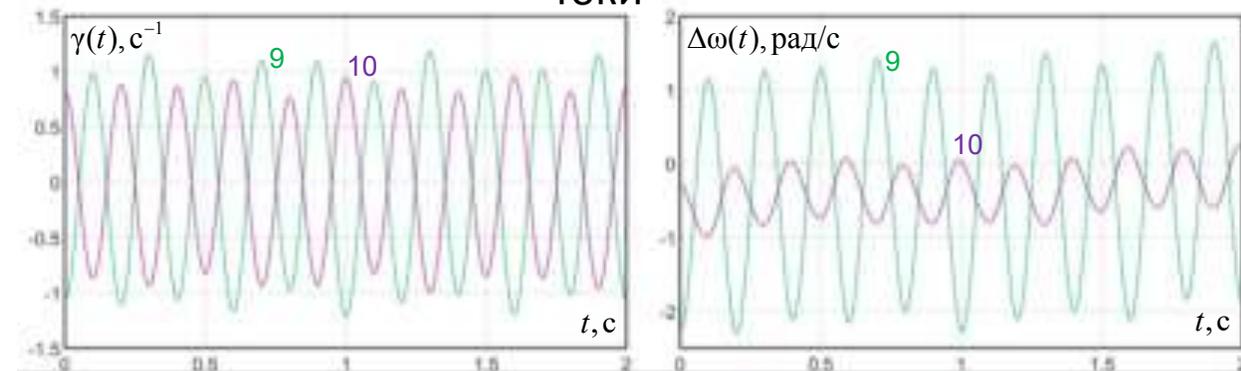
$$p_0 = \beta_{\pi} + j\omega_0, \quad \beta_{\pi} = \frac{R_{\pi}}{L_{\pi}}$$



напряжения

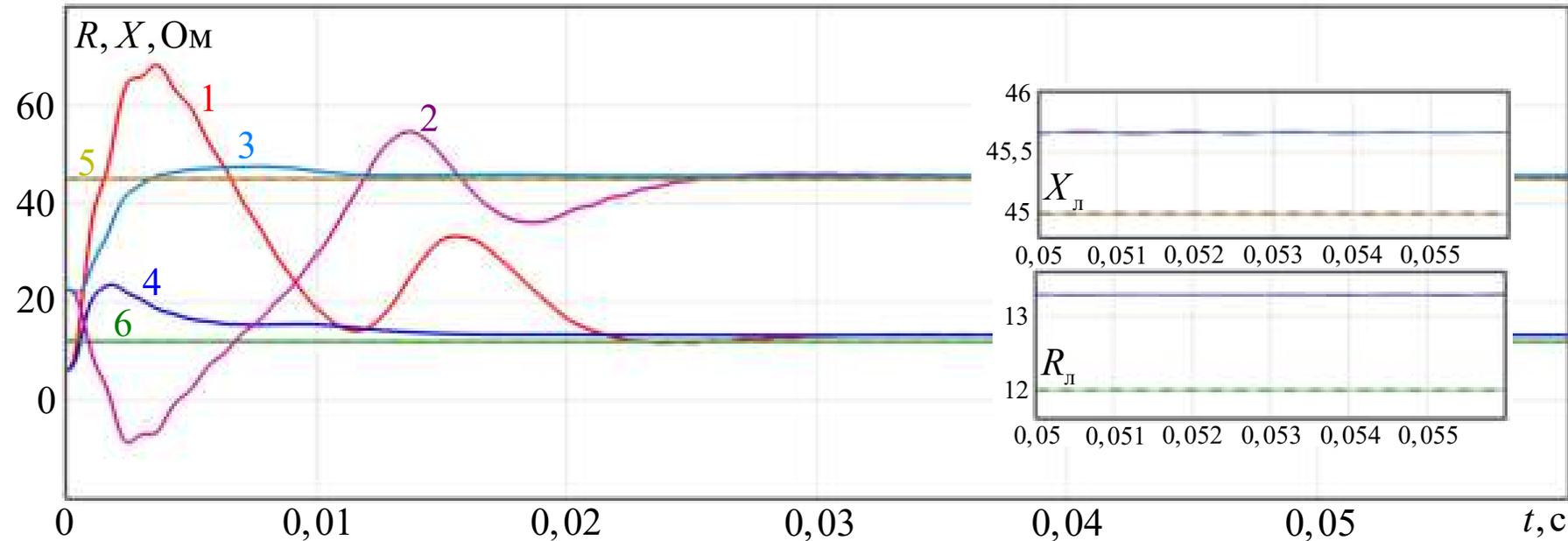


ТОКИ



Вариант 1

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

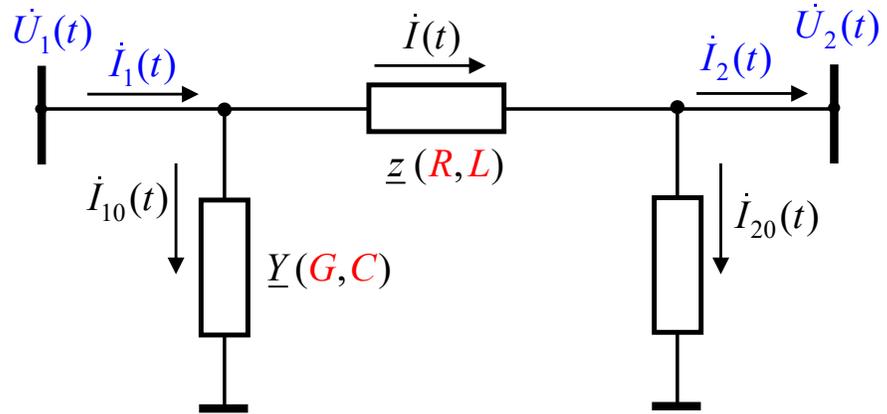


1,2 - традиционный алгоритм (RL),
 3,4 - новый алгоритм (RL),
 5,6 - новый алгоритм (RLC)

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

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

Вариант 2



$$\underline{Y}_0(t) = \frac{\Delta \dot{I}(t)}{\Delta \dot{U}(t)}, \text{ где } \Delta \dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) - \dot{I}_2(t), \Delta \dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)$$

$$\underline{Y}_0(t) = G_0(t) + j\omega_0 C_0(t)$$

$$\hat{C}(t) = C_0(t) \frac{\omega_0}{\omega_0 + \Delta\omega_\Delta(t)}$$

$$\hat{G}(t) = G_0(t) - \gamma_\Delta(t) \hat{C}(t)$$

$$\text{где } \rho_\Delta(t) = \gamma_\Delta(t) + j\Delta\omega_\Delta(t) = \frac{\Delta \dot{U}'(t)}{\Delta \dot{U}(t)}$$

$$\dot{I}_{10}(t) = (\hat{G}(t) + j\omega_0 \hat{C}(t)) \dot{U}_1(t) + \hat{C}(t) \dot{U}'_1(t)$$

$$\dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) - \dot{I}_{10}(t)$$

$$\underline{z}_0(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t)} = R_0(t) + j\omega_0 L_0(t)$$

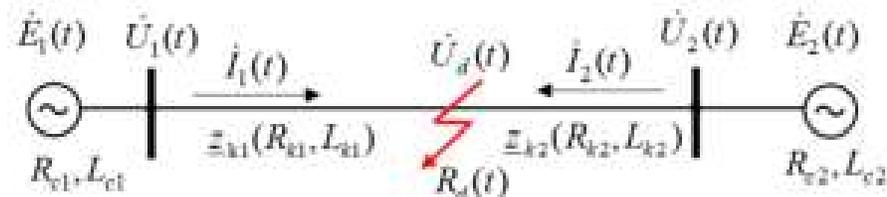
$$\hat{L}(t) = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \Delta\omega(t)} L_0(t)$$

$$\hat{R}(t) = R_0(t) - \gamma(t) \hat{L}(t)$$

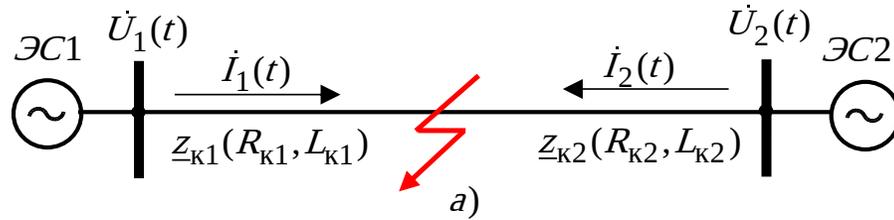
Исследование *синхровекторов электромеханических и электромагнитных переходных* процессов позволяет разработать новые алгоритмы релейной защиты, автоматики, мониторинга и управления.

Требования к устройствам РЗА с поддержкой СВИ:

- повышения быстродействия и снижение требований по точности обработки сигналов;
- расширение диапазона измерений синхровекторов;
- обеспечение правильной работы РЗА в условиях электромагнитных переходных процессов;
- повышение темпа передачи синхровекторов;
- использование новых протоколов передачи данных СВИ;
- обеспечение надежной синхронизации устройств РЗА;
- разработка новых тестов для испытаний устройств РЗА.

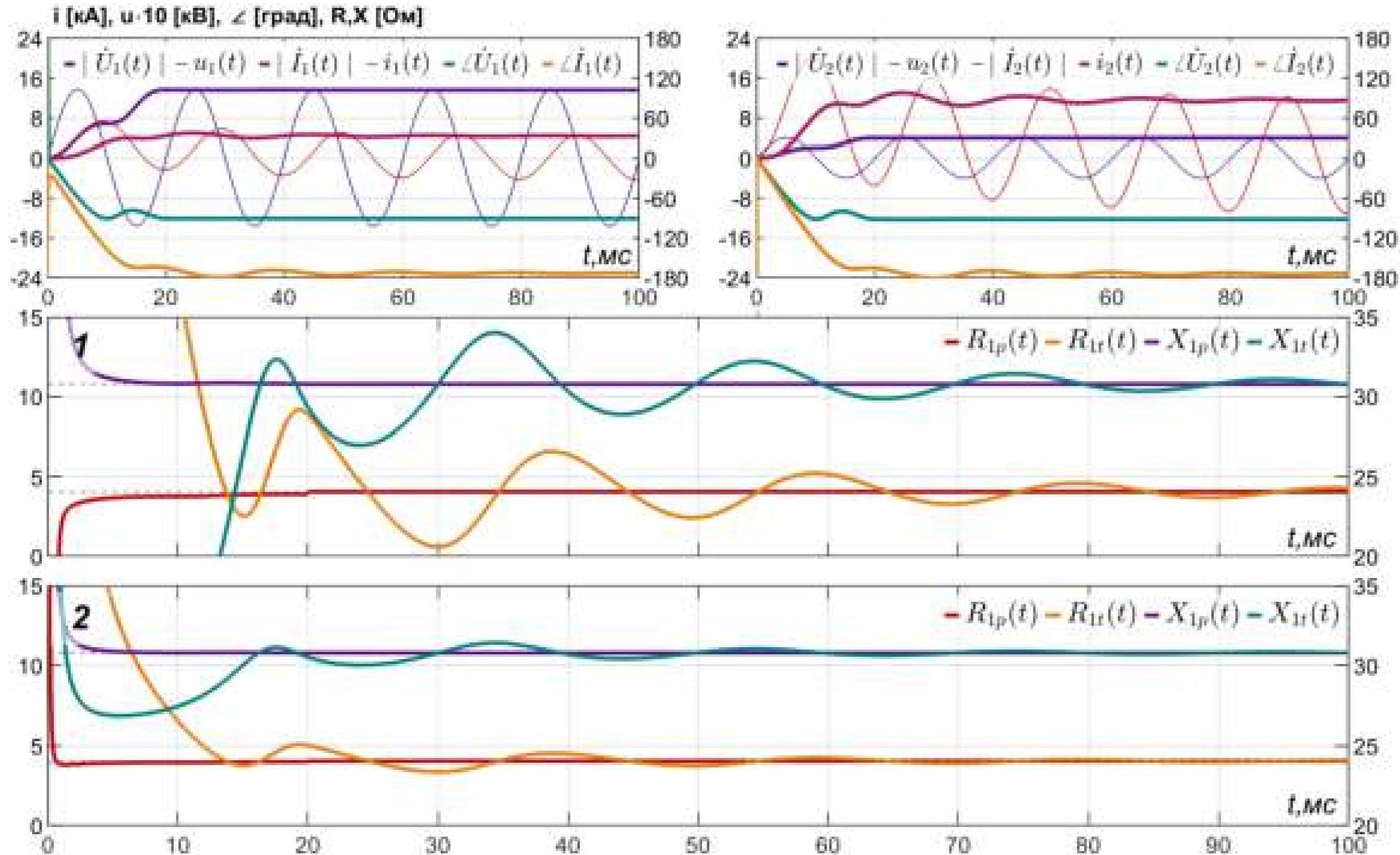


№	Наименование	Выражение
1	Алгоритм ДЗ при одностороннем измерении синхровекторов при междуфазных КЗ	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + k\dot{I}'(t)}$ <p>где $\dot{I}'(t) = \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$, $k = L_{yn}/z_{yn}$</p>
	Расстояние до точки КЗ	$\hat{l}_k(t) = \frac{\dot{U}(t)}{z_{yn}\dot{I}(t) + L_{yn}\dot{I}'(t)}$
2	Алгоритм ДЗ при одностороннем измерении синхровекторов при однофазных КЗ	$\hat{z}_{A0}(t) = \frac{\dot{U}_A(t)}{\dot{I}_A(t) + k_{\underline{0}}3\dot{I}_0(t) + k_{\underline{1}}\dot{I}'_A(t) + k_{\underline{01}}3\dot{I}'_0(t)}$ <p>где $k_{\underline{0}} = \frac{z_{0yn} - z_{1yn}}{3z_{1yn}}$, $k_{\underline{1}} = \frac{L_{1yn}}{z_{1yn}}$, $k_{\underline{01}} = \frac{L_{0yn} - L_{1yn}}{3z_{1yn}}$</p>
3	Алгоритм ДЗ при одностороннем измерении синхровекторов со стороны первой энергосистемы	$\hat{z}_1(t) = \frac{\Delta\dot{U}(t) + z_{yn}\dot{I}_2(t) + L_{yn}\dot{I}'_2(t)}{\dot{I}(t) + k\dot{I}'(t)}$ <p>где $\Delta\dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)$, $\dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)$, $\dot{I}'(t) = \dot{I}'_1(t) + \dot{I}'_2(t)$</p>
	Расстояние до точки КЗ	$\hat{l}_k(t) = \frac{\Delta\dot{U}(t) + z_{yn}\dot{I}_2(t) + L_{yn}\dot{I}'_2(t)}{z_{yn}\dot{I}(t) + L_{yn}\dot{I}'(t)}$



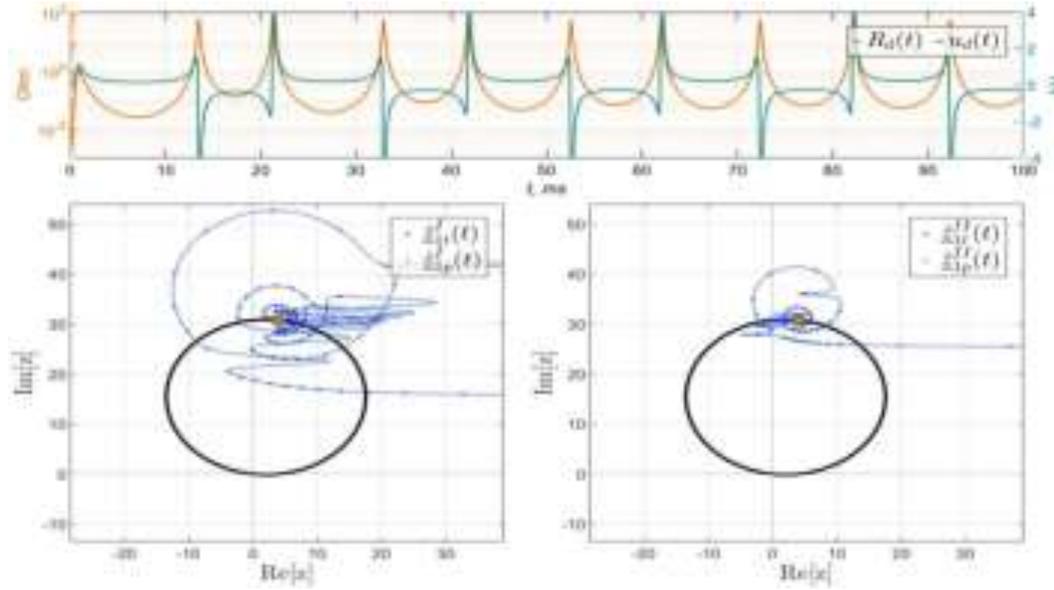
Наименование	Вариант 1	Вариант 2
Односторонняя оценка $\hat{z}_{1k}(t)$	$\hat{z}_0(t) = \frac{\dot{U}_1(t)}{\dot{I}_1(t)}, \hat{z}_0(t) = R_0(t) + j\omega_0 L_0(t)$ $\hat{L}_{k1}(t) = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \Delta\omega(t)} L_0(t),$ $\hat{R}_{k1}(t) = R_0(t) - \gamma(t) \hat{L}_{k1}(t)$	$\hat{z}_{k1}(t) = z_0(t) \frac{P_0}{P_0 + p(t)}$ $p_0 = \beta_{\pi} + j\omega_0, \beta_{\pi} = \frac{R_{\pi}}{L_{\pi}}$
Двухсторонняя оценка $\hat{z}_{1k}(t)$	$\hat{z}_0(t) = \frac{\Delta\dot{U}(t) + z_{\pi} \dot{I}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)},$ $\hat{L}_{k1}(t) = \frac{\omega_0}{\omega_0 + \Delta\omega(t)} L_0(t),$ $\hat{R}_{k1}(t) = R_0(t) - \gamma(t) \hat{L}_{k1}(t)$	$\hat{z}_{k1}(t) = z_0(t) \frac{P_0}{P_0 + p(t)}$ $\Delta\dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)$

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

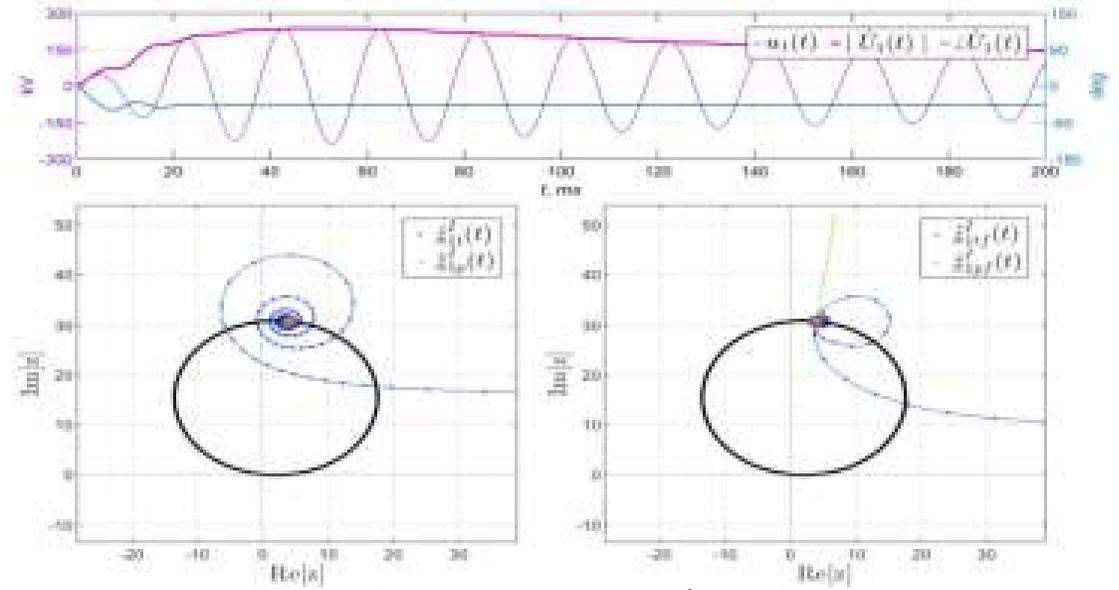


$R_{1p}(t), X_{1p}(t)$ - новый алгоритм, $R_{1t}(t), X_{1t}(t)$ - традиционный алгоритм

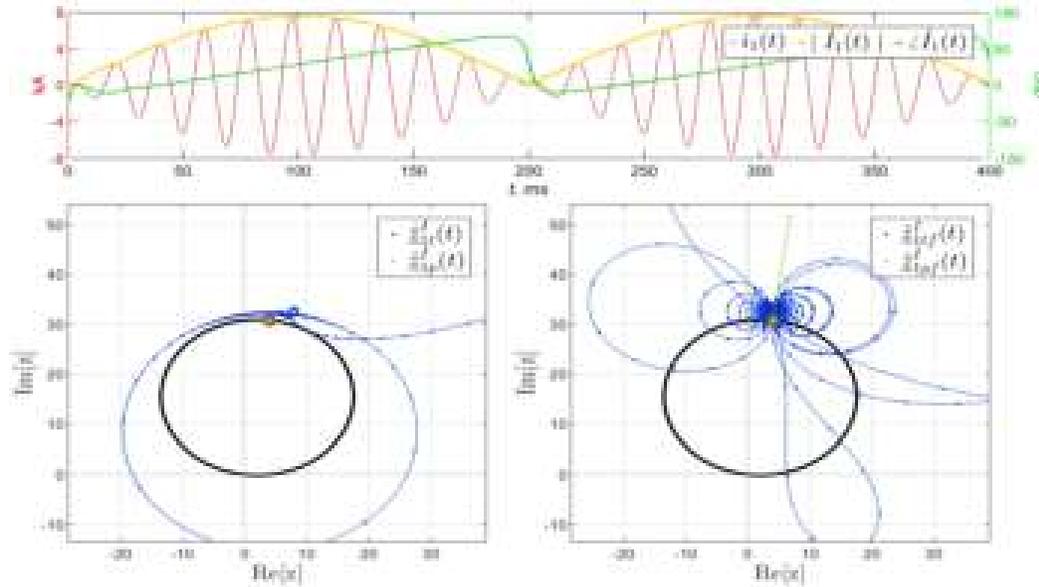
Переходное сопротивление



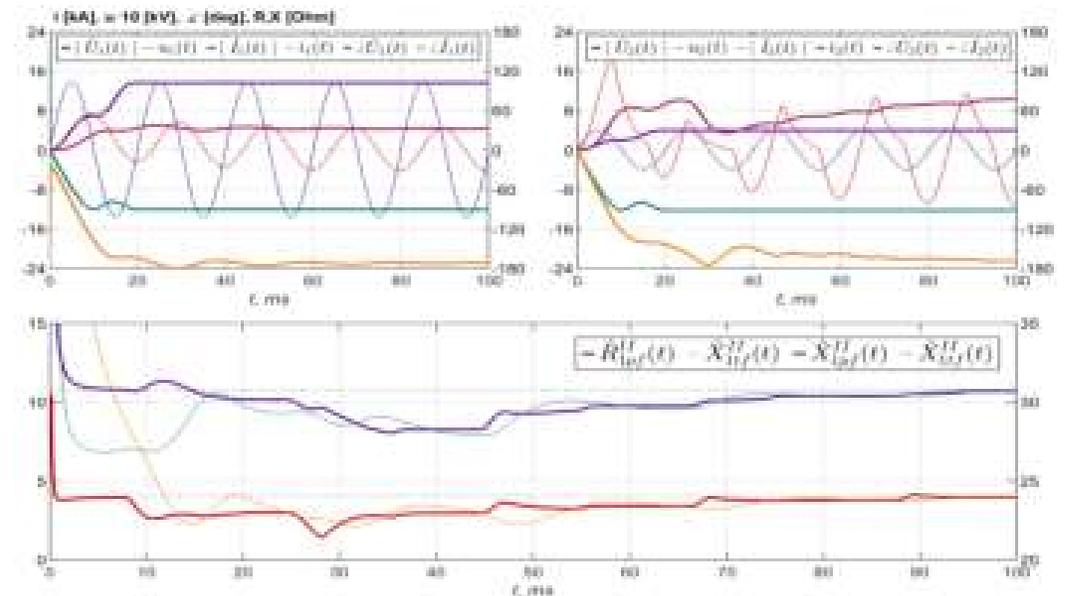
Сочетание э/м и э/мех ПП



Асинхронный режим

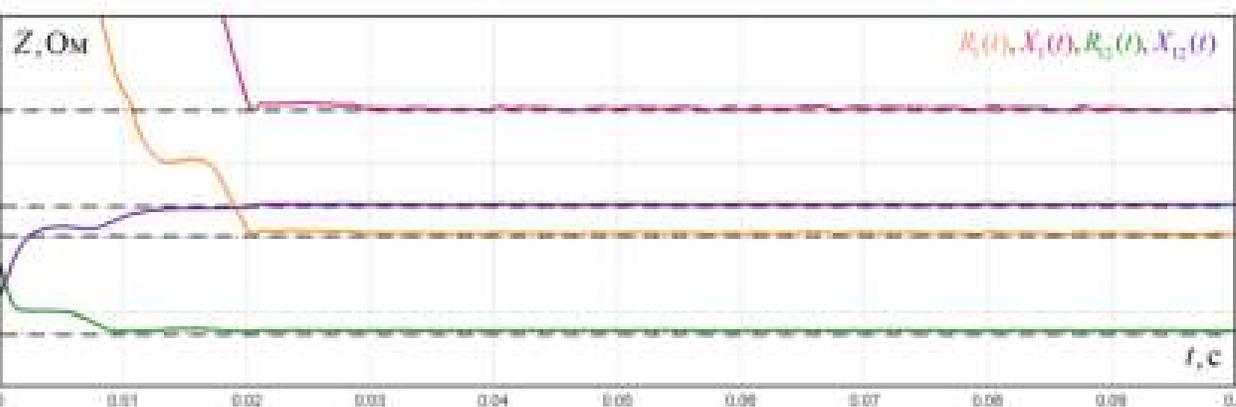


Погрешности ТТ/ТН



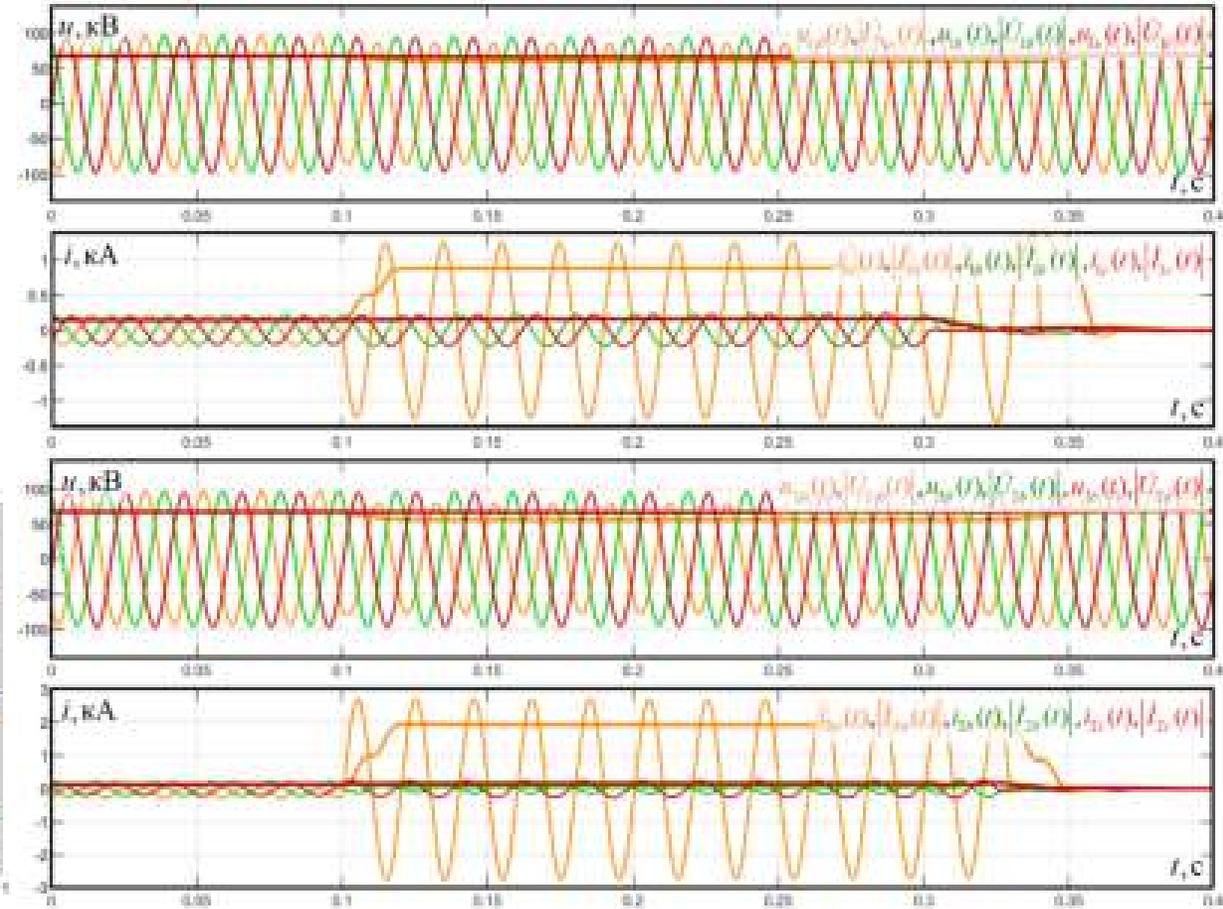


Структурная схема сети



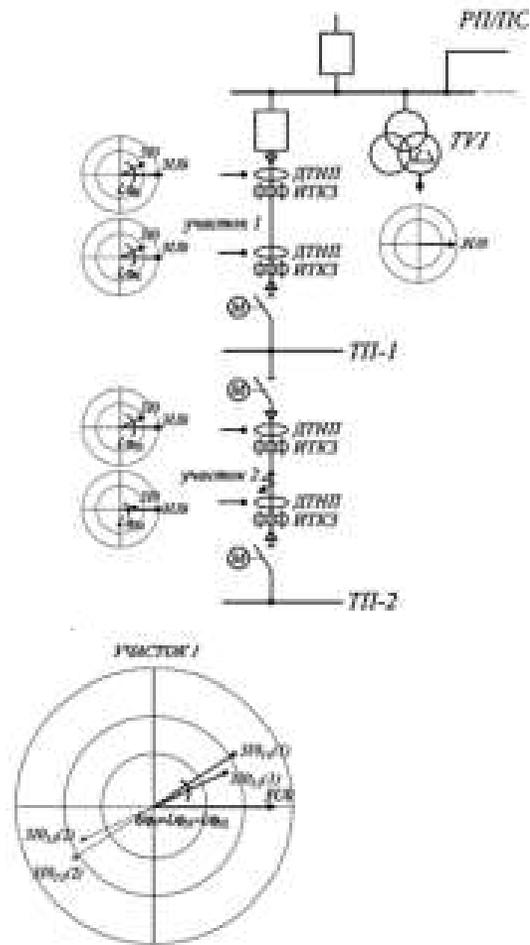
Оценка сопротивления петли КЗ

Однофазное КЗ в ВЛ 110 кВ

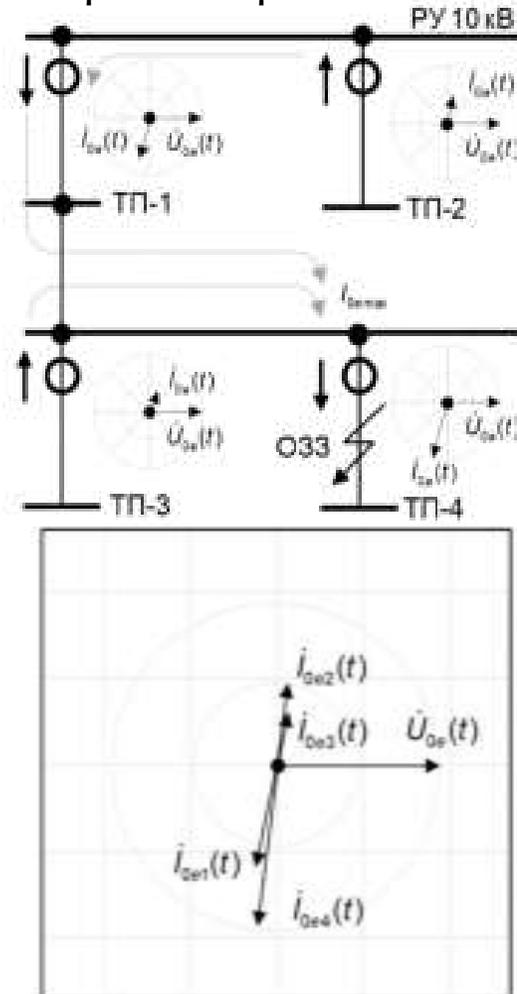


Осциллограммы напряжений и токов

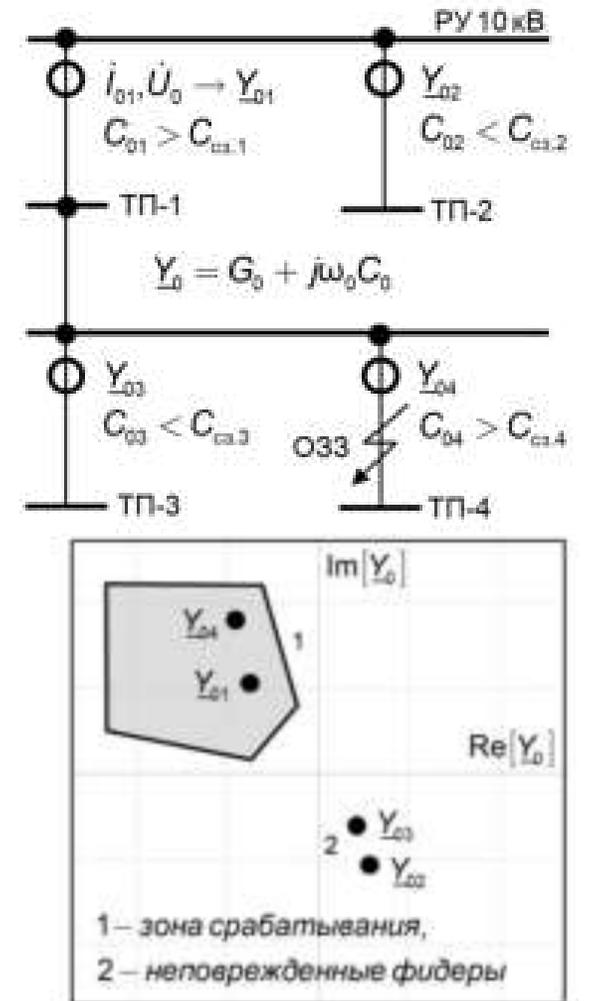
1. Защита при использовании синхровекторов тока и напряжения НП



2. Направленная защита НП при использовании эквивалентных синхровекторов ВГ



3. Адмитансный принцип выполнения защиты от ОЗЗ



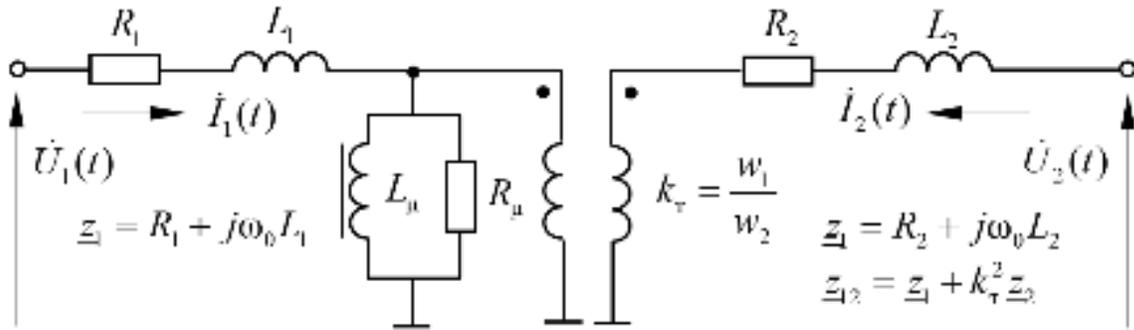


Рис.16 – Т-образная схема замещения СТ

Дифференциальное уравнение СТ в синхровекторах:

$$\dot{U}_1(t) - k_1 \dot{U}_2(t) = \frac{1}{2} L_{12} \left(\dot{J}'_1(t) + \frac{1}{k_1} \dot{J}'_2(t) \right) + \frac{1}{2} R_{12} \left(\dot{I}_1(t) + \frac{1}{k_1} \dot{I}_2(t) \right)$$

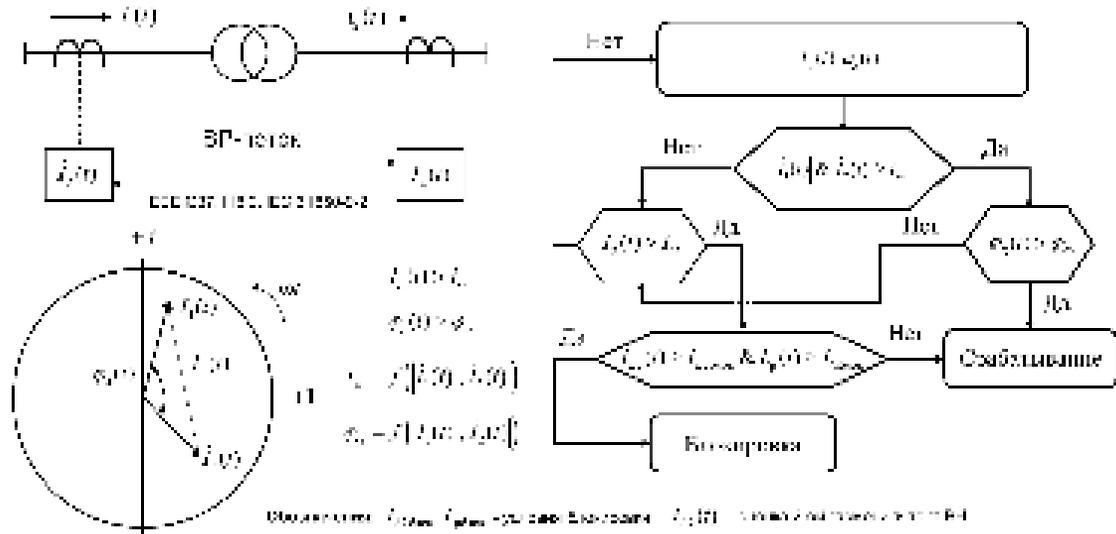
Обозначения:

$$k = \frac{L_{12}}{z_{12}}, \dot{X}'(t) = \frac{d\dot{X}(t)}{dt}, \dot{X}''(t) = \frac{d^2\dot{X}(t)}{dt^2},$$

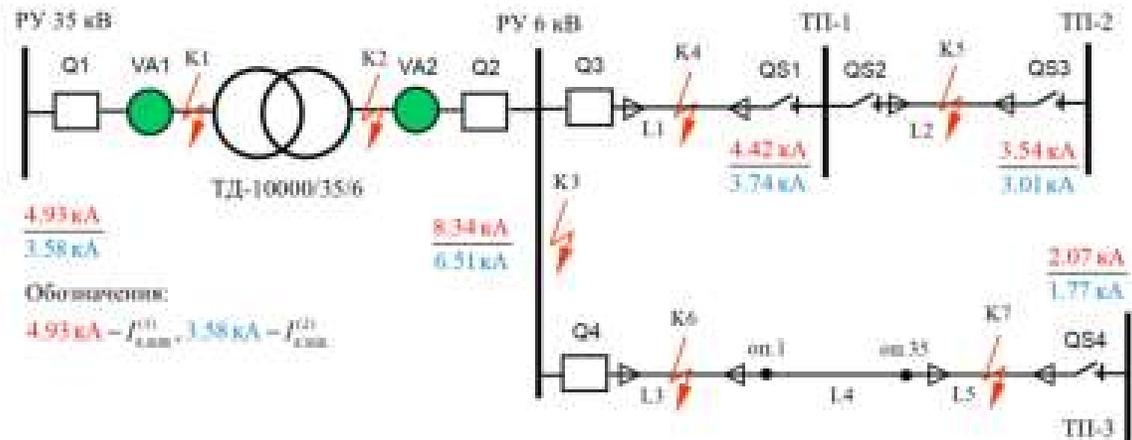
$$\dot{J}'(t) = \dot{I}'(t) + j\omega_0 \dot{I}(t).$$

Таблица 1 Применение алгоритмов на основе СВИ

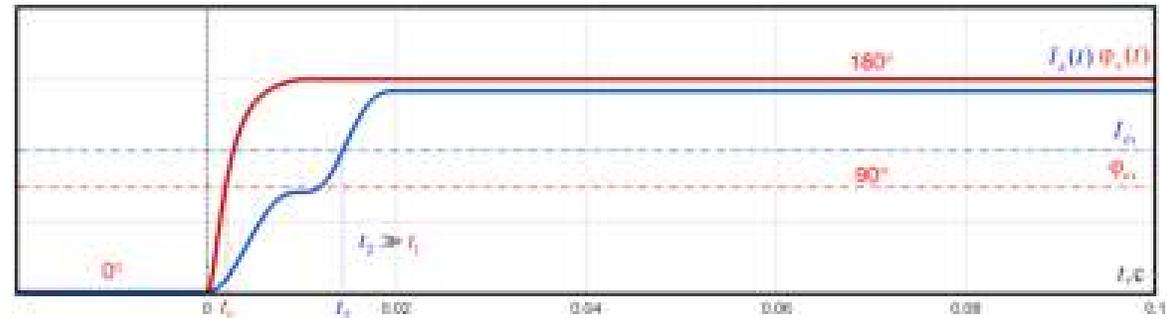
Тип	Характеристика	Выражение
Мониторинг состояния СТ	<ul style="list-style-type: none"> - оценка параметров СТ в нормальном режиме (в т.ч. при внешних КЗ); - обеспечение функций системы мониторинга. 	$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - k_1 \dot{U}_2(t)}{x(\dot{I}_1(t) + k \dot{I}'_1(t)) + (1-x)k_1^{-1}(\dot{I}_2(t) + k \dot{I}'_2(t))}$
Дифференциальный принцип защиты	<ul style="list-style-type: none"> - дифференциально-фазный принцип; - дополнительный критерий для блокировки защиты при БНТ; - снижение тока небаланса. 	$ \dot{I}_a(t) = \dot{I}_1(t) + k \dot{I}'_1(t) - k_1^{-1}(\dot{I}_2(t) + k \dot{I}'_2(t)),$ $\varphi_a(t) = \arg\left(\frac{\dot{I}_1(t) + k \dot{I}'_1(t)}{\dot{I}_2(t) + k \dot{I}'_2(t)}\right), \dot{I}_a(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - z_1 \dot{I}_1(t) + L_1 \dot{I}'_1(t)}{\dot{I}_1(t) + k_1^{-1} \dot{I}_2(t)}$
Дистанционный принцип защиты	<ul style="list-style-type: none"> - оценка сопротивления при внутреннем КЗ; - высокое быстродействие и точность при э/м процессах. 	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - k_1 \dot{U}_2(t) + k_1^{-1} z_{12} (\dot{I}_2(t) + k \dot{I}'_2(t))}{\dot{I}_1(t) + k \dot{I}'_1(t) + k_1^{-1} (\dot{I}_2(t) + k \dot{I}'_2(t))}$



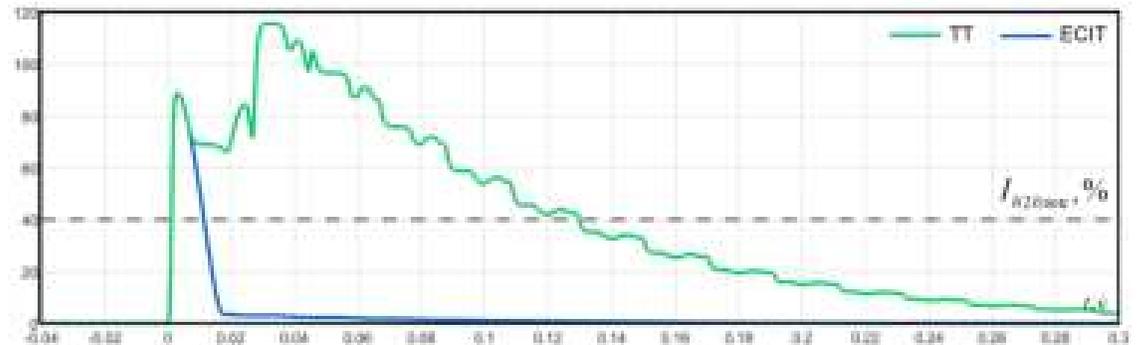
Структурная схема защиты СТ



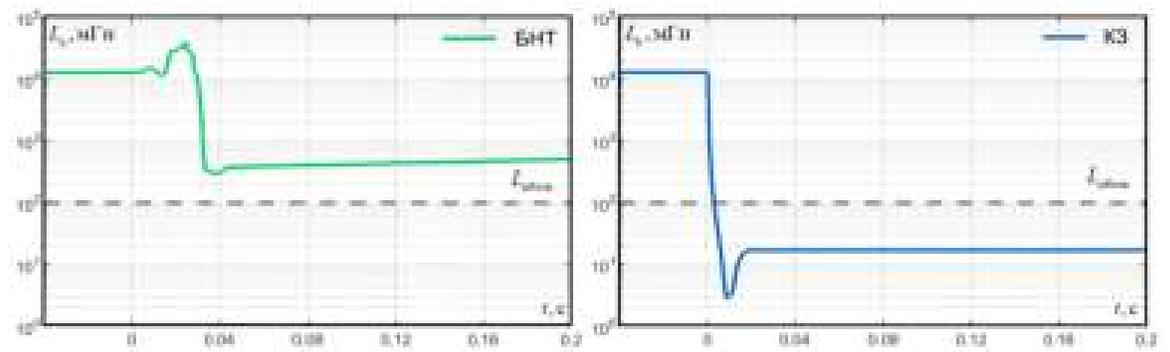
Структурная схема модели



Оценка модуля и фазы дифф. тока

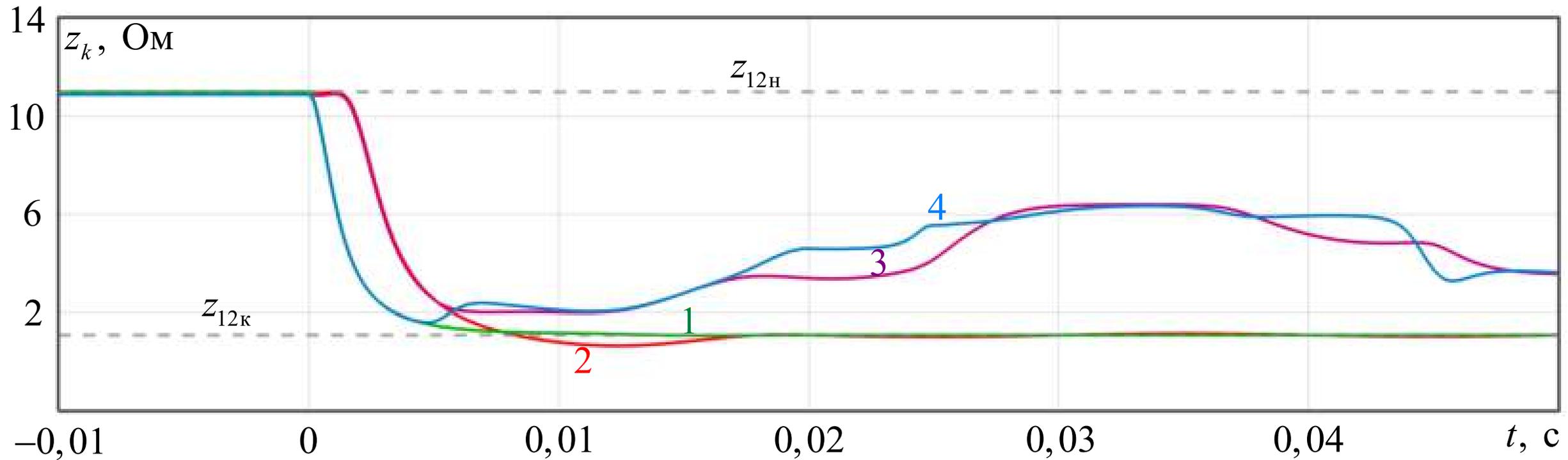


Вторая гармоника тока при КЗ ВН

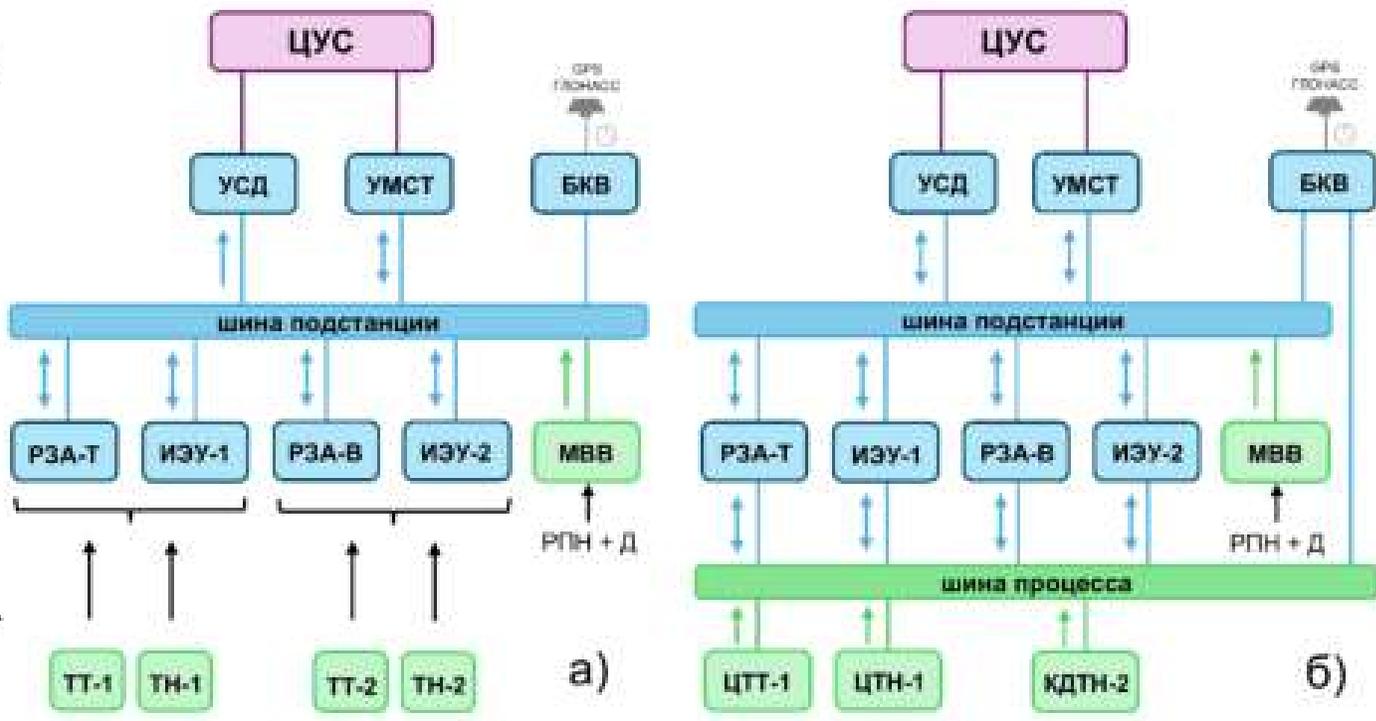
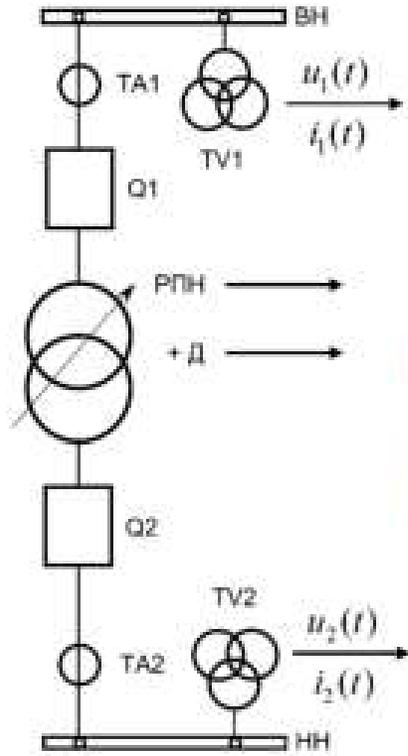


Оценка индуктивности намагничивания

Оценка модуля сопротивления при КЗ в трансформаторе



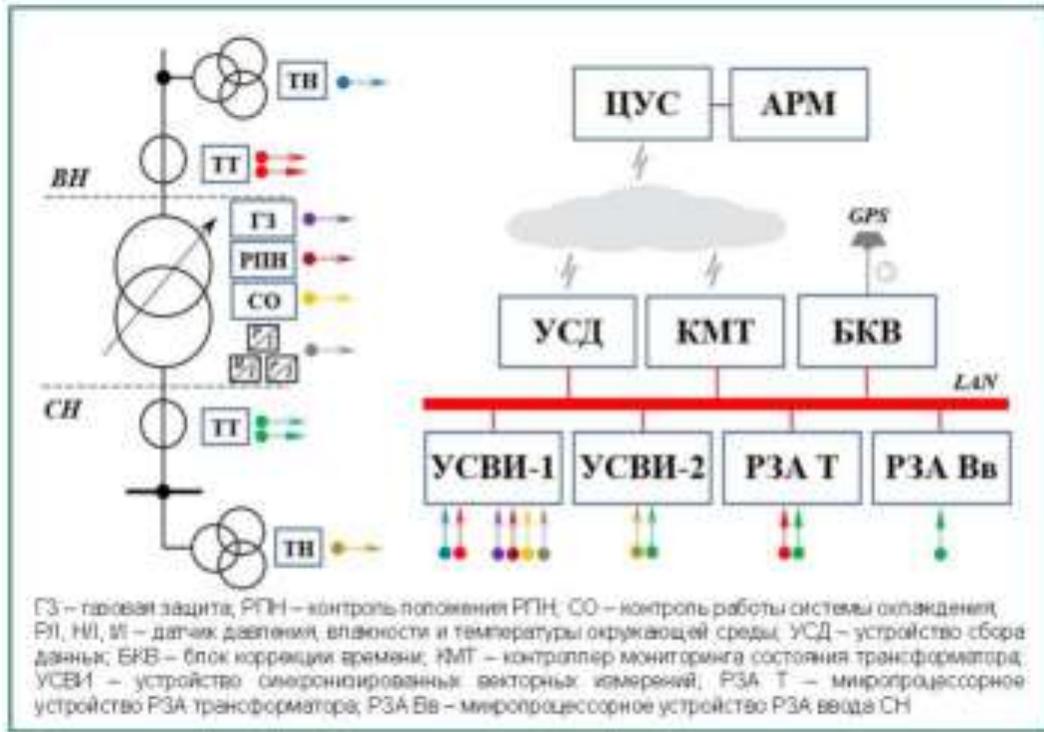
- 1 - цифровые измерительные трансформаторы и новый алгоритм,
- 2 - цифровые измерительные трансформаторы и традиционный алгоритм,
- 3 - электромагнитные измерительные трансформаторы и традиционный алгоритм,
- 4 - электромагнитные измерительные трансформаторы и новый алгоритм,



ЦУС – центр управления сетями; УСД – устройство сбора данных; УМСТ – устройство мониторинга состояния СТ, РЗА-Т – устройство защиты и автоматики СТ, МИУ – многофункциональное измерительное устройство, БКВ – блок коррекции времени, МВВ – модуль ввода/вывода, Д – датчики дополнительных параметров, РЗА-В – РЗА ввода НН, КДТН – цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения



Автоматизация центров питания РС на основе СВИ



Выявление дефектов силового трансформатора



T-1 Parameters

Sn	10 MVA	Kc	5.806
Uv	38.5 kV	Z12	11.2 Ohm
Un	6.6 kV	Z0	4.5e3 Ohm
Uk	8.2 %	LTC	±6x1.5%
Ic	3.3 %	S/G	Y0/D-11
Pk	29.6 kW		
Px	91.5 kW		



Механизм повреждения	Виды дефектов	Параметр
Электромагнитные силы, вызванные током КЗ	Деформация обмотки	$\text{Im}[\dot{\tilde{z}}_2(t)]$
Повреждение изоляции обмоток	Межвитковое замыкание, замыкание параллельных проводников	$\text{Re}[\dot{\tilde{z}}_2(t)], \dot{I}_\mu(t)$
Ухудшенный контакт и перегрев контактов отводов РПН или ПБВ	Перегрев и эрозия контактов	$\text{Re}[\dot{\tilde{z}}_2(t)]$
Механическое смещение или перегрев проводника	Обрыв цепи	$\dot{I}_\mu(t)$
Механическое воздействие перевозбуждение магнитопровода	Увеличение потерь, пожар в стали	$\dot{I}_\mu(t), \dot{I}_\mu(t)$

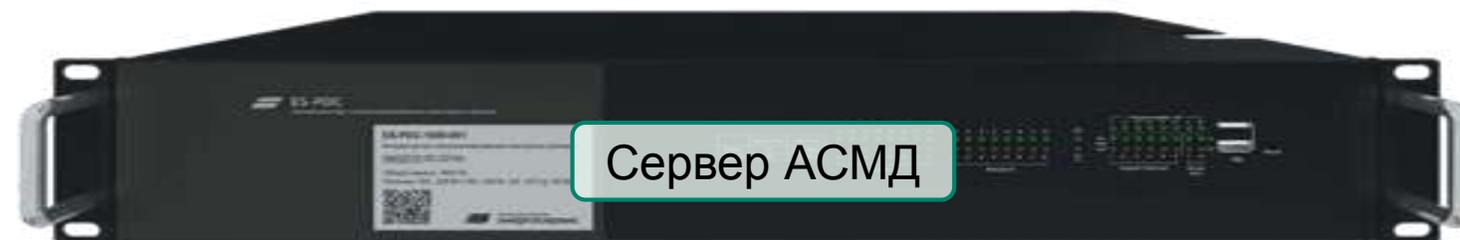
Аналитический модуль МИСТ обрабатывает данные, поступающие с информационно - измерительной системы и выявляет anomalous режимы работы СТ и его характеристики с учетом реализуемых расчётно-аналитических моделей.

• **Основное оборудование:**

- **ЭНИП-2 УСВИ (PMU)** – устройство синхронизированных векторных измерений, многофункциональный измерительный преобразователь (МИП);
- **ЭНКС-2** – блок коррекции времени (БКВ);
- **ЭНМВ-1** – модуль ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов (МВВ);
- **ЭНКС-3м** – устройство сбора и передачи данных (сервер ССПИ);
- **МИСТ** – устройство мониторинга и диагностики состояния силового трансформатора (УМСТ);
- **ES-PDC** – сервер системы мониторинга трансформатора (Сервер АСМД).



АСМД включает типовые **серийно производимые** компоненты.



Основные измерения:

- фазные напряжения обмоток трансформатора в комплексном виде;
- фазные токи обмоток трансформатора в комплексном виде;
- фазные активные и реактивные мощности обмоток;
- частота сети;
- параметры качества электроэнергии (коэффициент гармонических искажений, уровни гармоник по напряжению до 50);
- фазные коэффициенты мощности обмоток.

Контроль диагностических параметров:

- импедансы продольных и поперечных ветвей схем замещения в комплексном виде;
- фазные и суммарные потери активной и реактивной мощности;
- токи холостого хода по фазам;
- напряжения короткого замыкания по фазам;
- потери короткого замыкания;
- потери холостого хода;
- коэффициент трансформации по фазам.



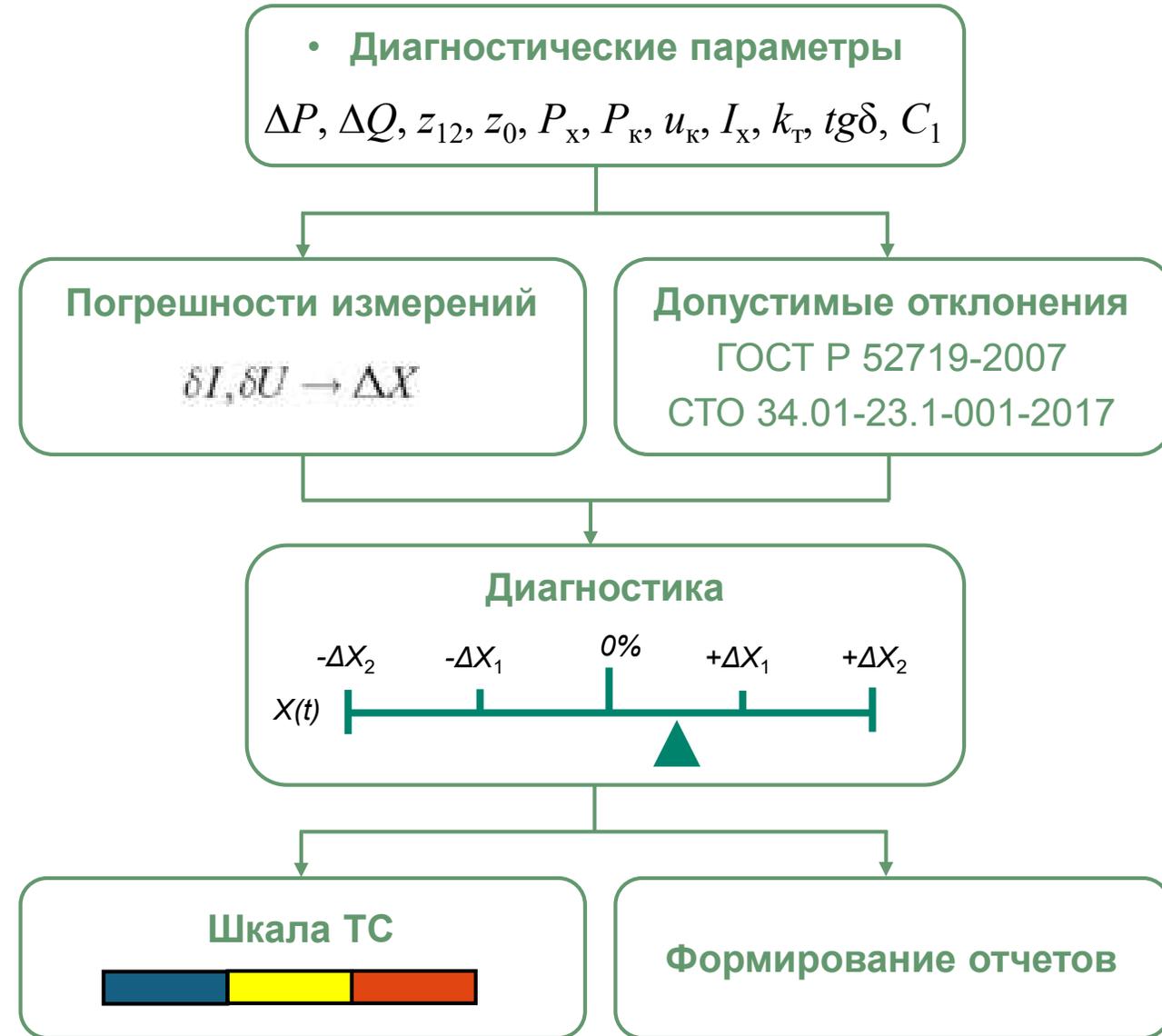
Сигнализация:

- предупредительные сигналы о выходе за установленные пределы диагностических параметров;
- предупредительные сигналы, сформированные событием о медленно развивающихся дефектах;
- сигналы об аварийном отклонении параметров, срабатывании защит;
- сигналы об обнаруженных неисправностях технических средств.

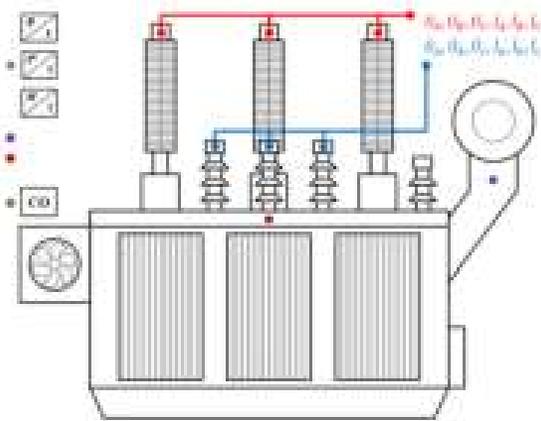
Деление сигнализации на аварийную и предупредительную осуществляется путем присвоения каждому сигналу определенного класса тревог.

Действие сигнализации:

- специальные звуковые и световые сигналы;
- занесение сигнала в список аварийных сигналов и список событий с отметкой признака аварии и указание метки времени.

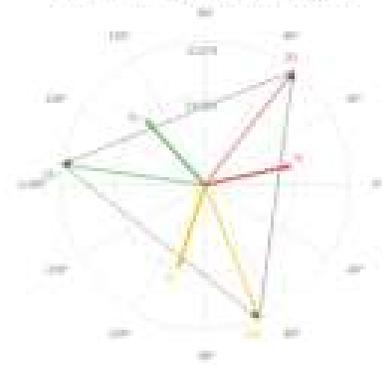


Мониторинг трансформатора



	Напряжение, В	Ток, А
+A	21120 ±47.800°	19 ±107.548°
+B	21109 ±151.909°	19 ±132.194°
+C	21079 ±52.244°	19 ±12.498°
-A	8618 ±98.233°	92 ±124.075°
-B	8609 ±141.529°	91 ±115.884°
-C	8644 ±21.899°	92 ±4.012°
	Расчётное	Теоретическое
W1	5.833	5.806
Z12	3.8 + j3.8	1.2 + j8.9
Z0	388.5 + j4110.2	378 + j4300
U _{нн}	2115.095	1823
I _{нн}	5.388	4.948
I _{нв}	117500.873	114354.791

Страна высокого напряжения



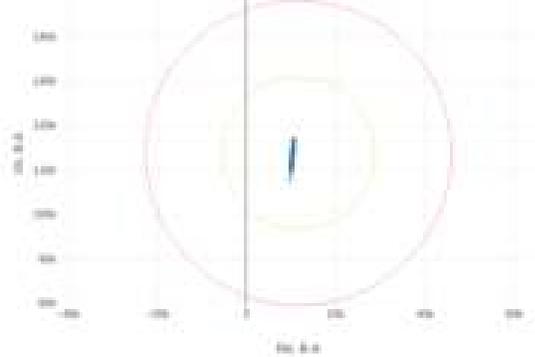
Страна низкого напряжения



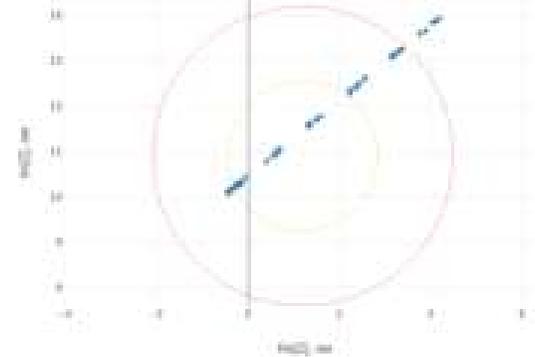
Потери активной мощности (ΔP)



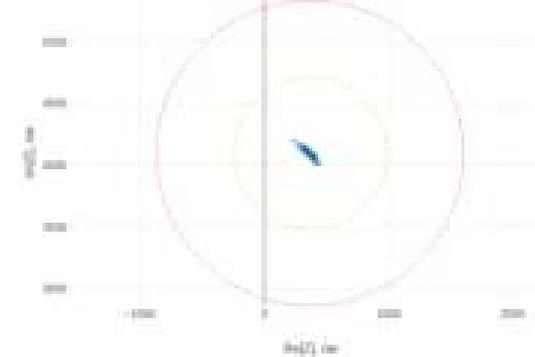
Потери реактивной мощности (ΔQ)



Методика Z12



Методика Z0



Коэффициент трансформации



Коэффициент загрузки



Напряжение U3



Ток I3



ПС № 8 (Архангельск)

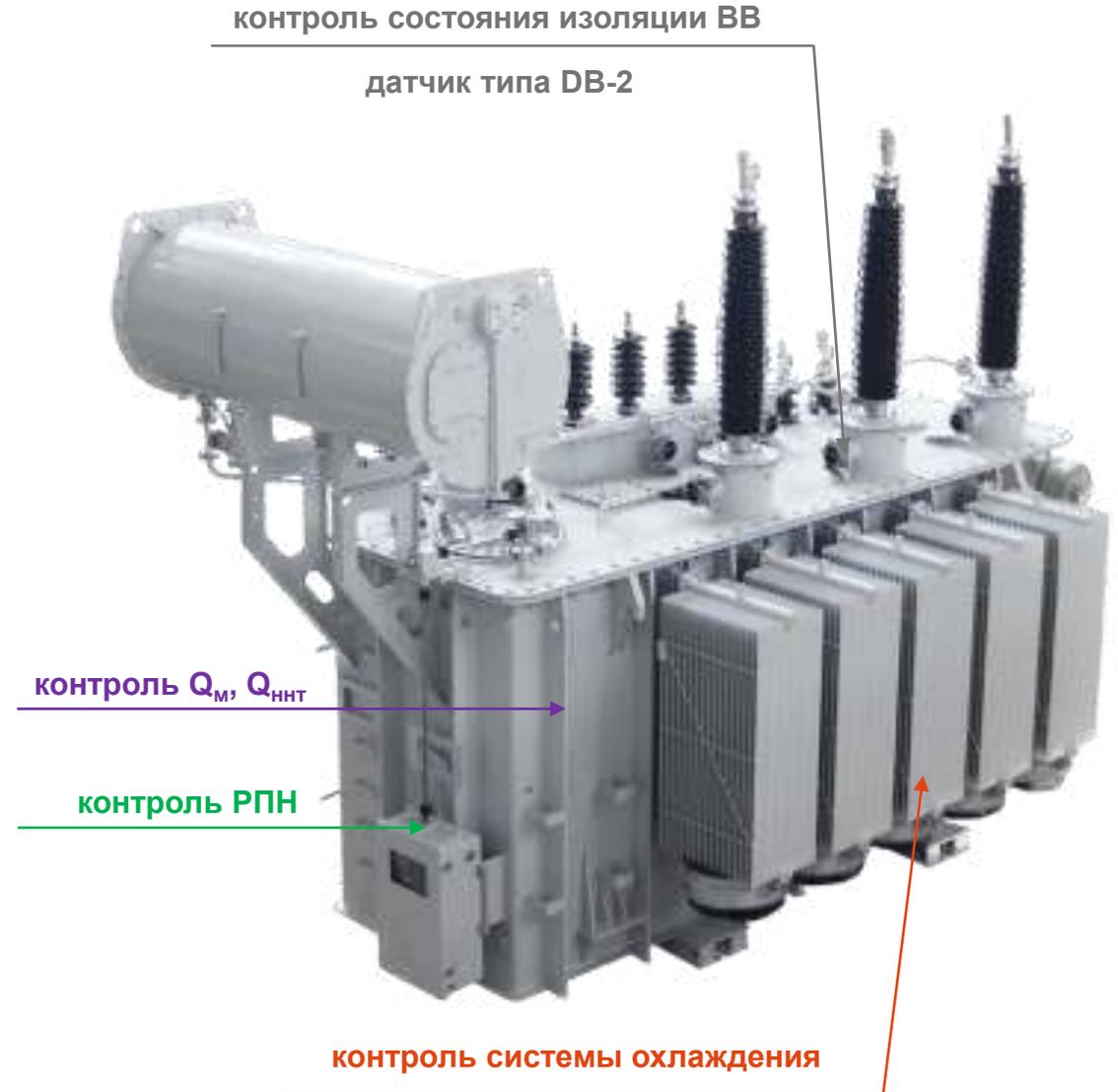
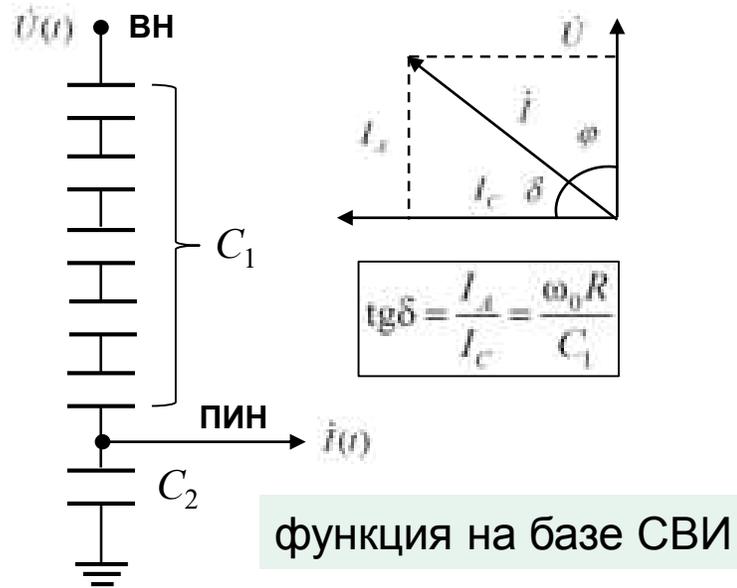


ПС № 7 (Архангельск)



Расширенные функции системы:

- контроль положения ступени РПН (логометр);
- измерение температуры трансформаторного масла, обмоток;
- контроль работы системы охлаждения;
- мониторинг состояния высоковольтных вводов (измерение тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и емкости C_1);
- измерение и контроль других диагностических параметров СТ.



Функции СМСТ на базе СВИ

оценка параметров схемы замещения

контроль перегрузочной способности

контроль сквозных токов КЗ, БТН

оценка степени износа витковой изоляции

контроль работы РПН, системы охлаждения

контроль параметров окружающей среды

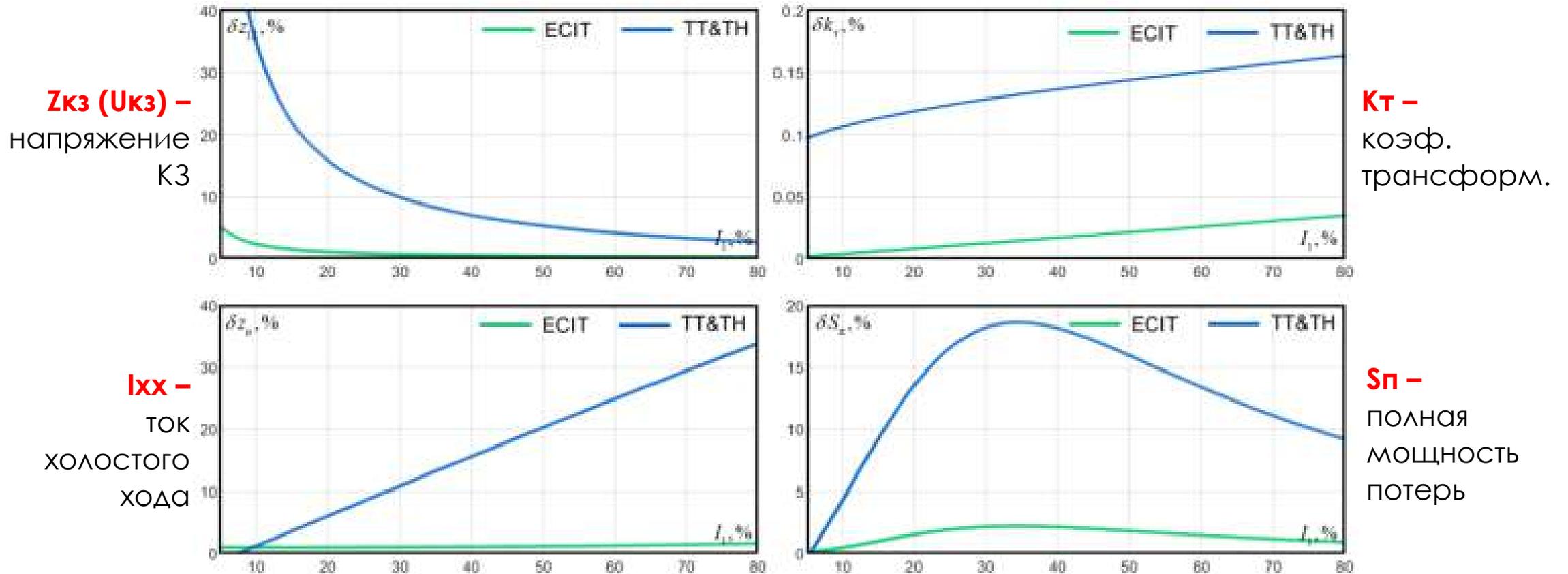
энергомониторинг (учет электроэнергии)

измерение и контроль ПКЭ

телеизмерение, телесигнализация



Вычисление параметров схемы замещения силовых трансформаторов в автоматизированной системе мониторинга и технической диагностики (АСМД)



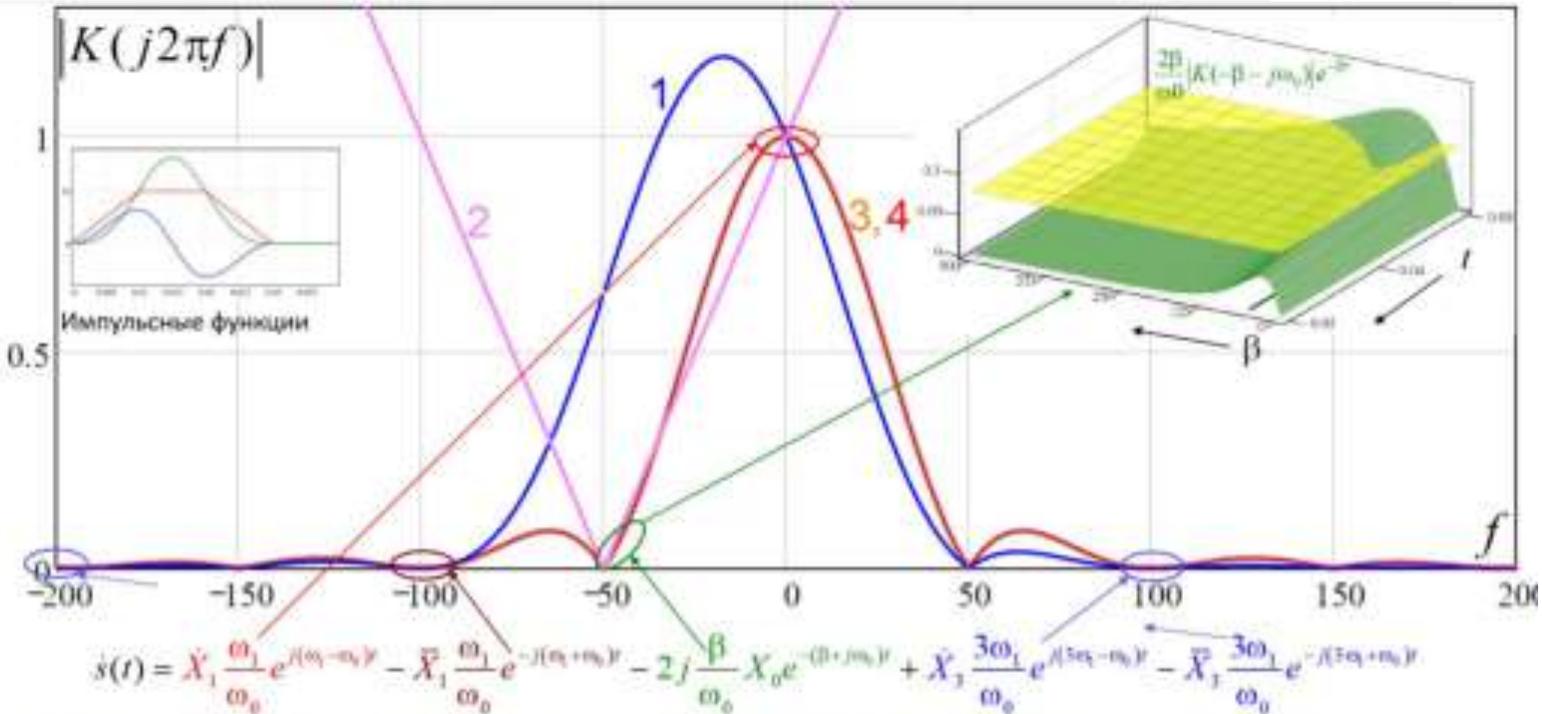
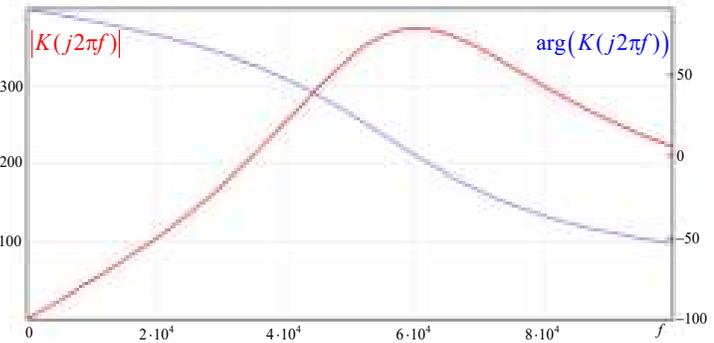
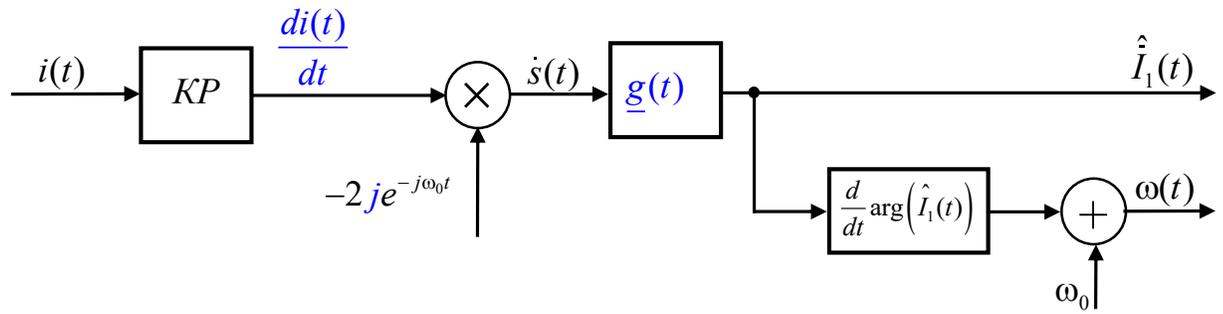
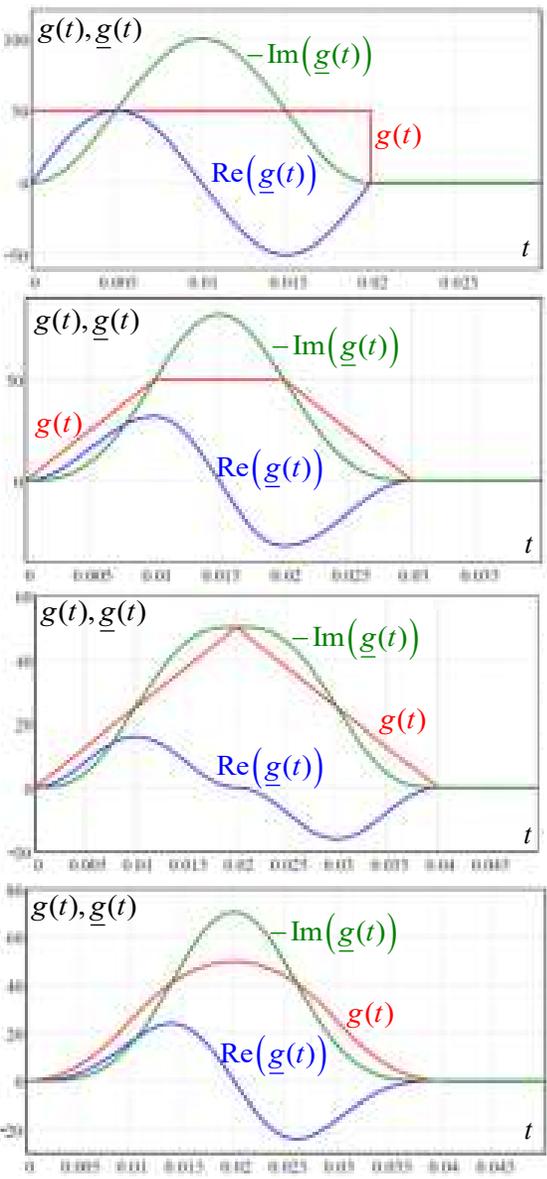
Z_{k3} (U_{k3}) –
напряжение
КЗ

K_T –
коэф.
трансформ.

I_{xx} –
ТОК
ХОЛОСТОГО
ХОДА

S_p –
ПОЛНАЯ
МОЩНОСТЬ
ПОТЕРЬ

Графики погрешностей вычисления параметров диагностики силовых трансформаторов на базе **традиционных** и **цифровых** ТТ&ТН от величины загрузки



- 1 АЧХ фильтра с комплексной импульсной функцией, полученного от фильтра с трапецидальной ИХ
- 2 смещенная АЧХ катушки Роговского
- 3 АЧХ фильтра с трапецидальной ИХ



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

$$\rho_i = -\alpha_i + j\omega_i$$

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

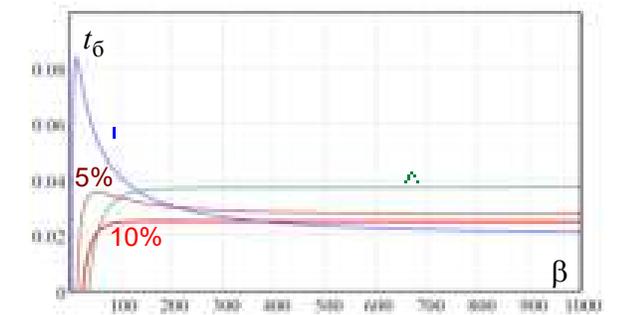
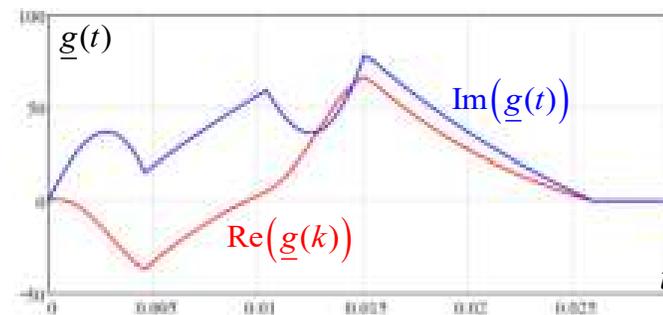
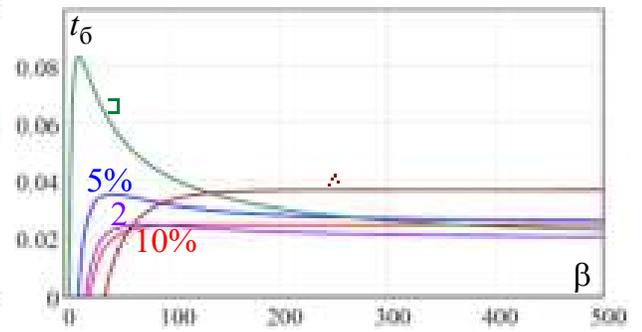
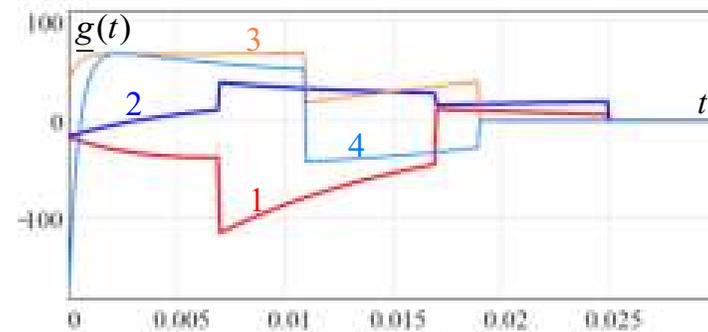
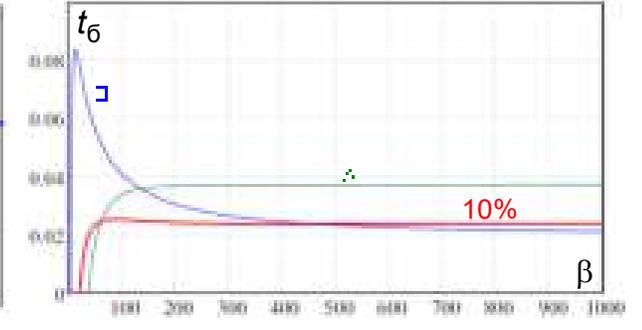
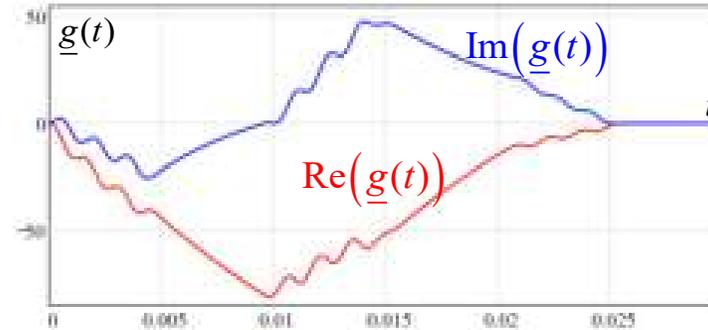
$$\underline{K}(p) = \sum_{i=1}^3 \underline{K}_i(p)$$

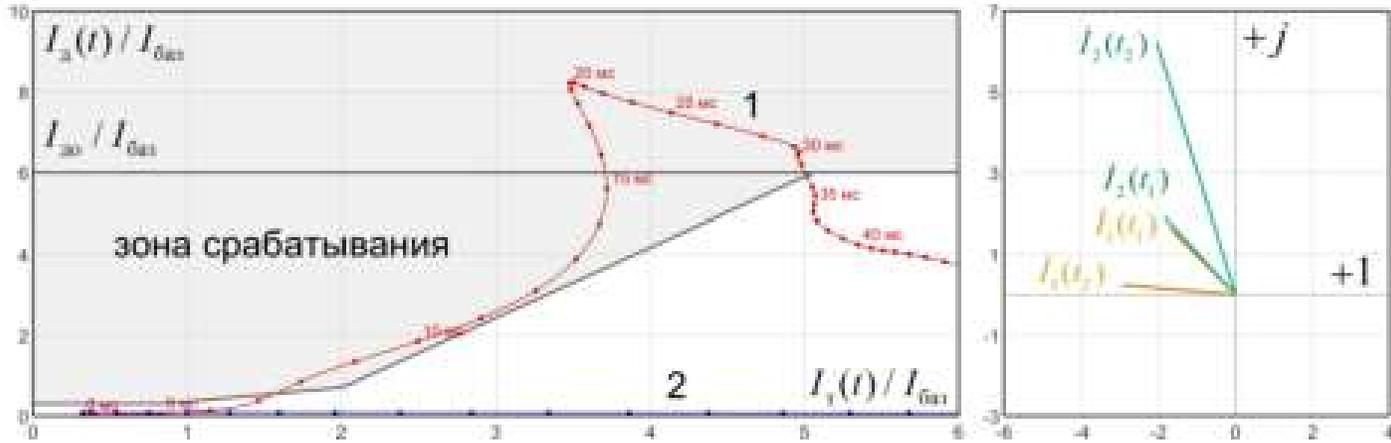
Последовательное

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

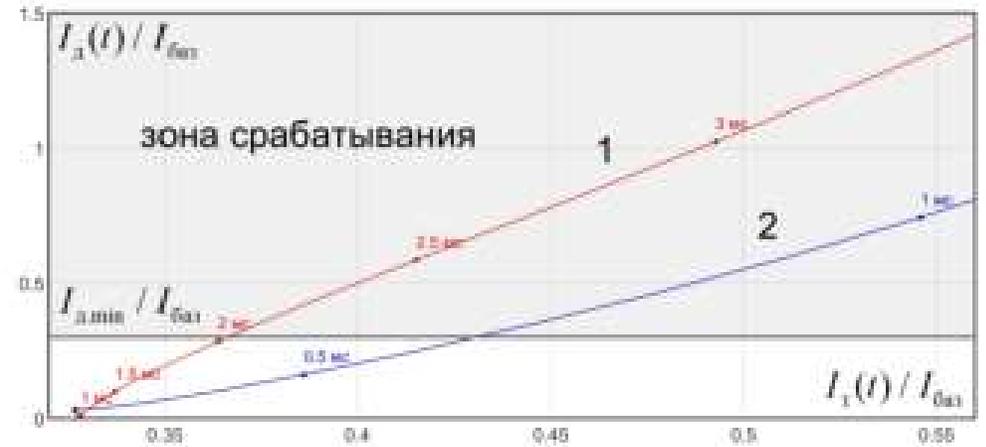
Смешанное

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

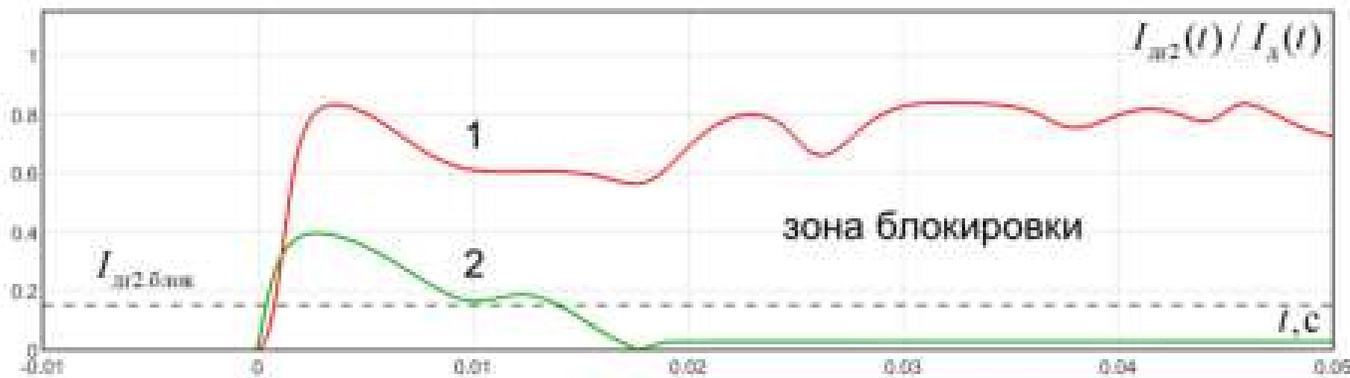




Характеристика срабатывания ДЗТ при внешнем КЗ:
1 – электромагнитный ТТ, 2 – цифровой ТТ



Хар-ка ДЗТ при КЗ ВН:
1 – электромагнитный ТТ, 2 – цифровой ТТ

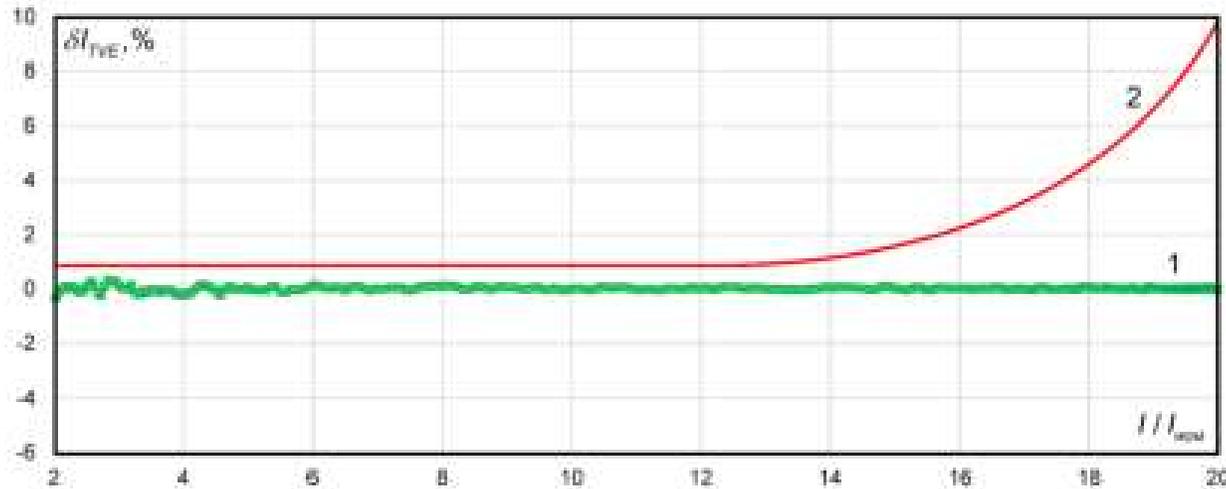


Оценка 2-ой гармоники тока СТ при КЗ ВН:
1 – электромагнитный ТТ, 2 – цифровой ТТ



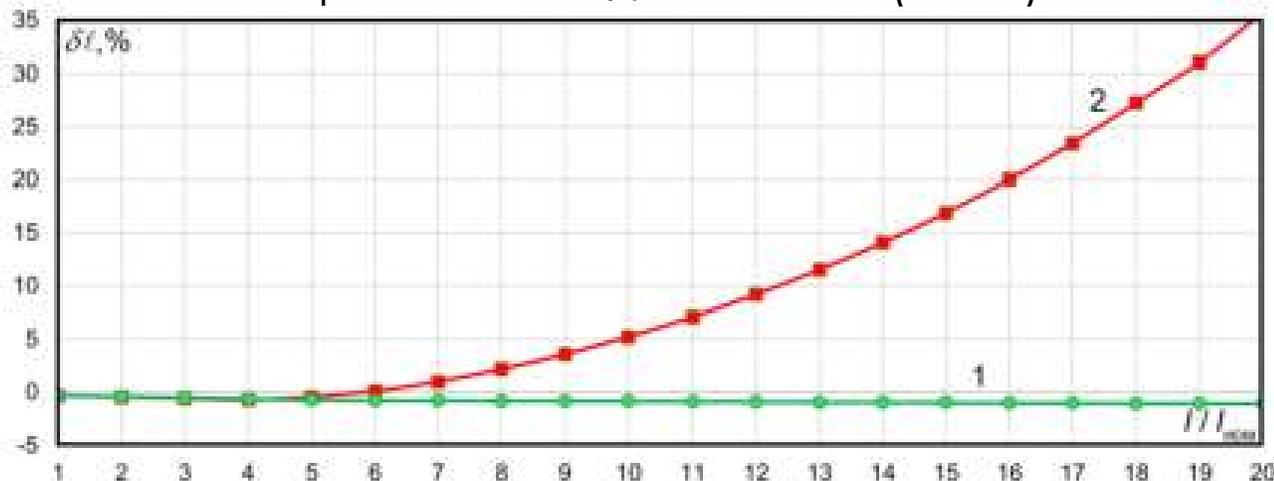
Комбинированный цифровой измерительный трансформатор ЕСИТ

Характеристика полной погрешности измерений тока



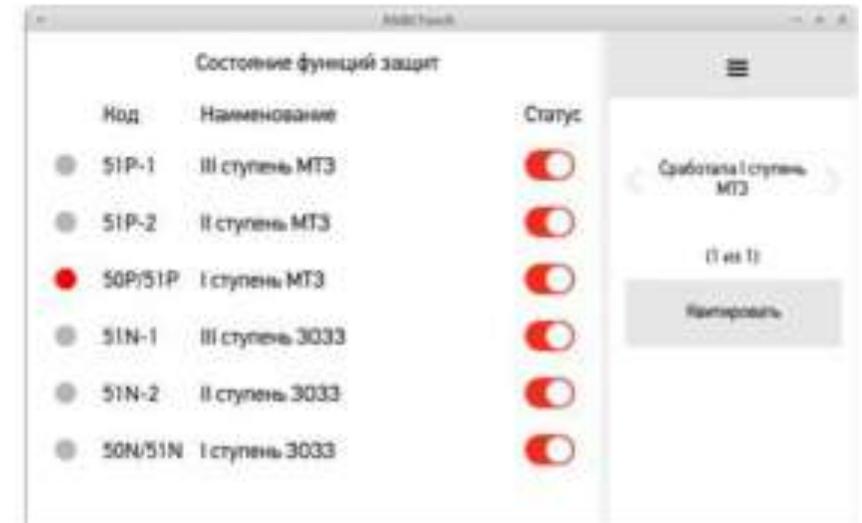
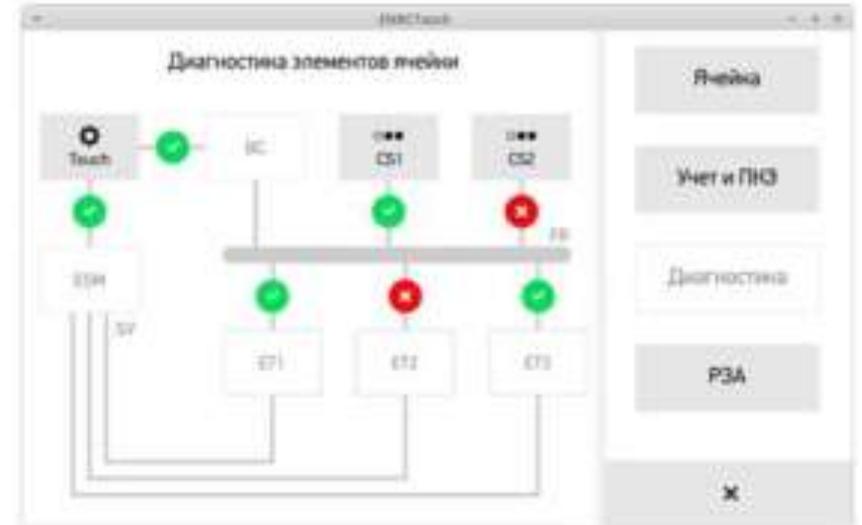
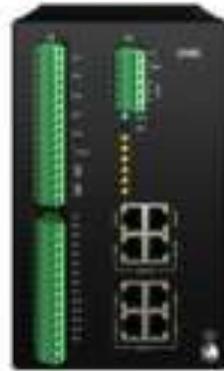
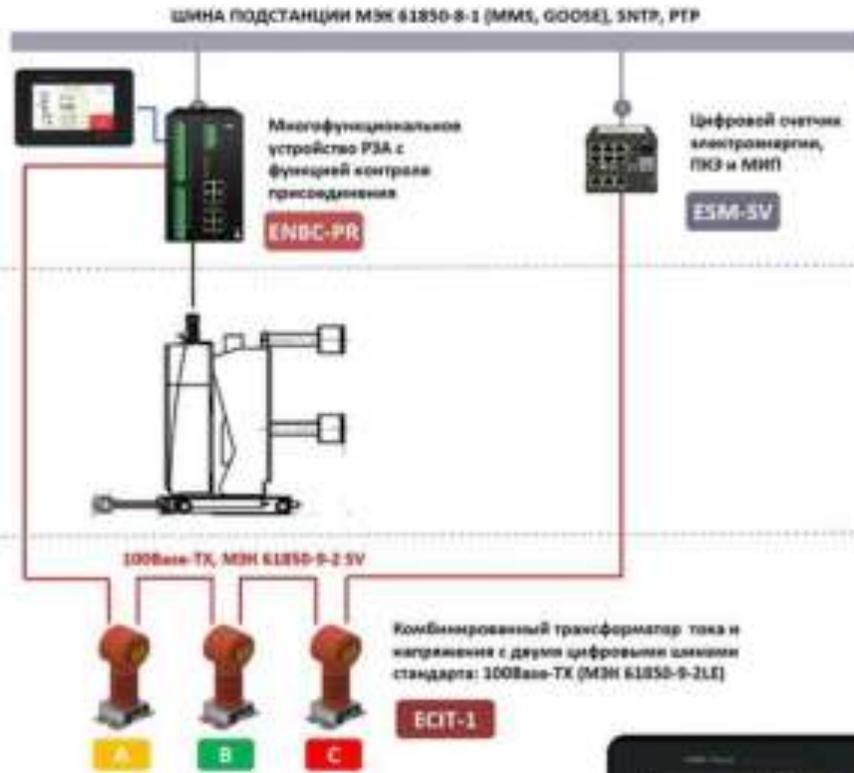
1 – ЦТТ, 2 – традиционные ТТ 10Р

Сравнение результатов оценки
расстояния до точки КЗ (ОМП)



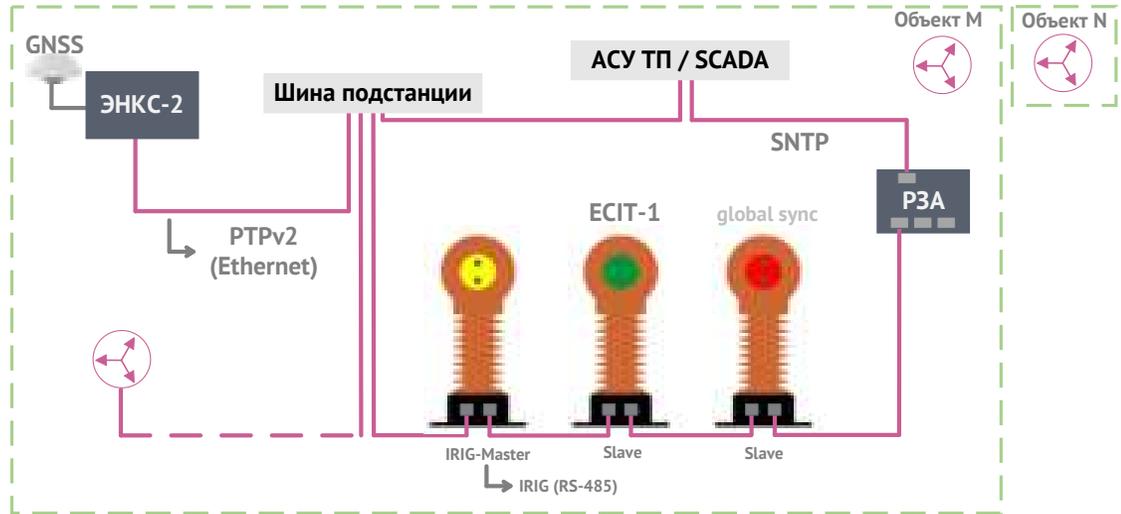
1 – ЦТТНК, 2 – традиционные ТТ 10Р и ТН 3Р

Цифровая ячейка
6-10кВ
на базе ПТН ES-GEAR

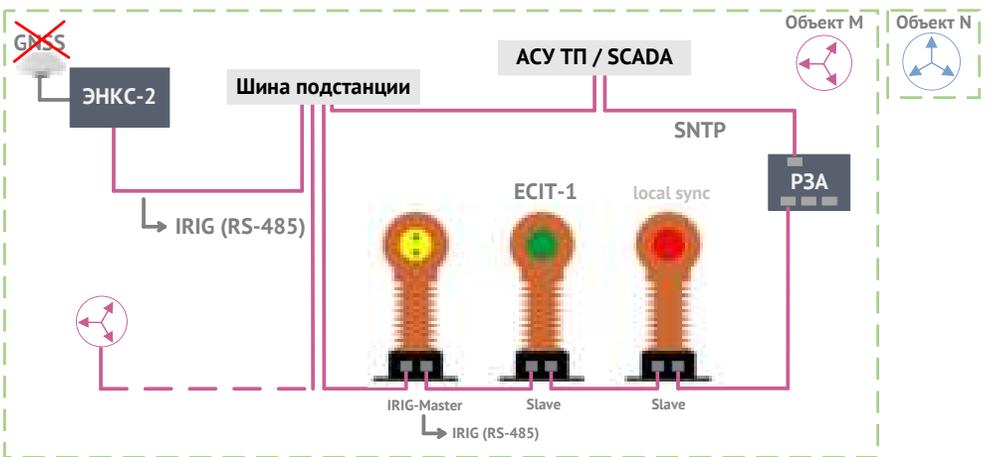




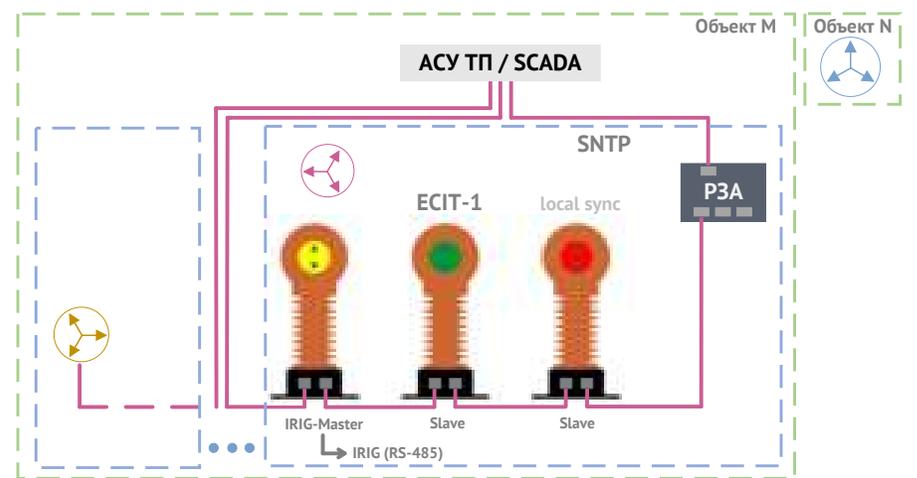
Глобальное время (UTC) – global sync



Локальное время объекта – local object sync



Локальное время присоединения – local node sync



МИП ТМ, счетчик (класс точности 0,2S), прибор для измерения ПКЭ, щитовой прибор, УСВИ (класс М)

ESM-HV



Традиционные
ТТ, ТН
1/5А
57/100 V

ESM-HV
0,2S/0,5 или 0,5S/1
class A или S
МПИ 12 лет

ESM-ET



Датчики
тока и напряжения
с низкоуровневыми
аналоговыми
выходами
ESM-ET
0,5S/1
class S
МПИ 12 лет

ESM-SV

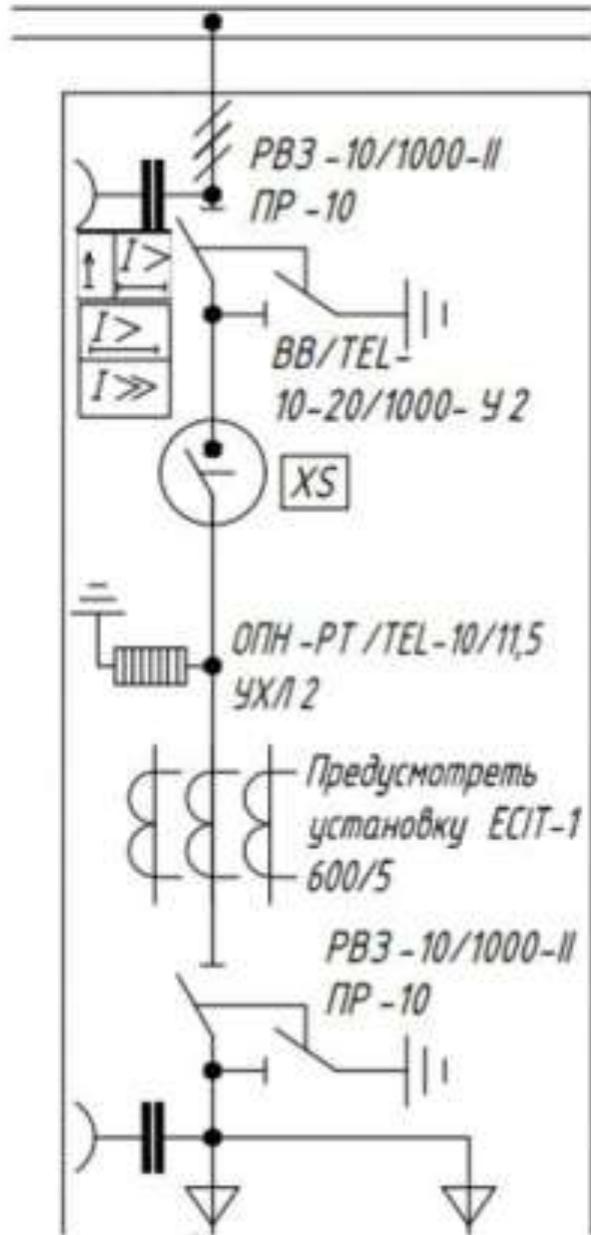


Традиционные
ТТ, ТН
и преобразователь аналоговых
сигналов (ПАС)

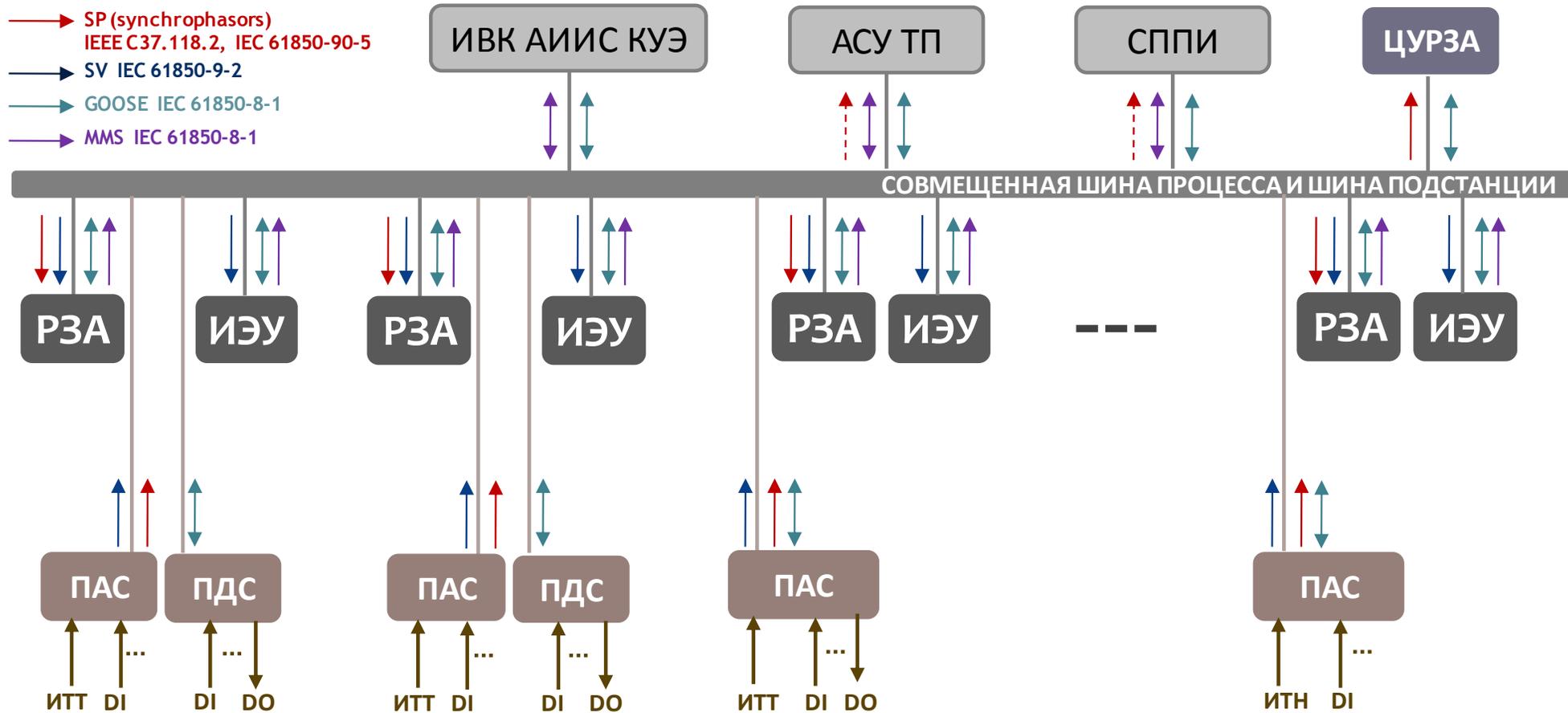
ESM-SV
0,2S/0,5
class A
МПИ 16 лет



Цифровые
ТТ, ТН
МЭК 61850-9-2



- SP (synchrophasors) IEEE C37.118.2, IEC 61850-90-5
- SV IEC 61850-9-2
- GOOSE IEC 61850-8-1
- MMS IEC 61850-8-1



ENMU
с 2019
года



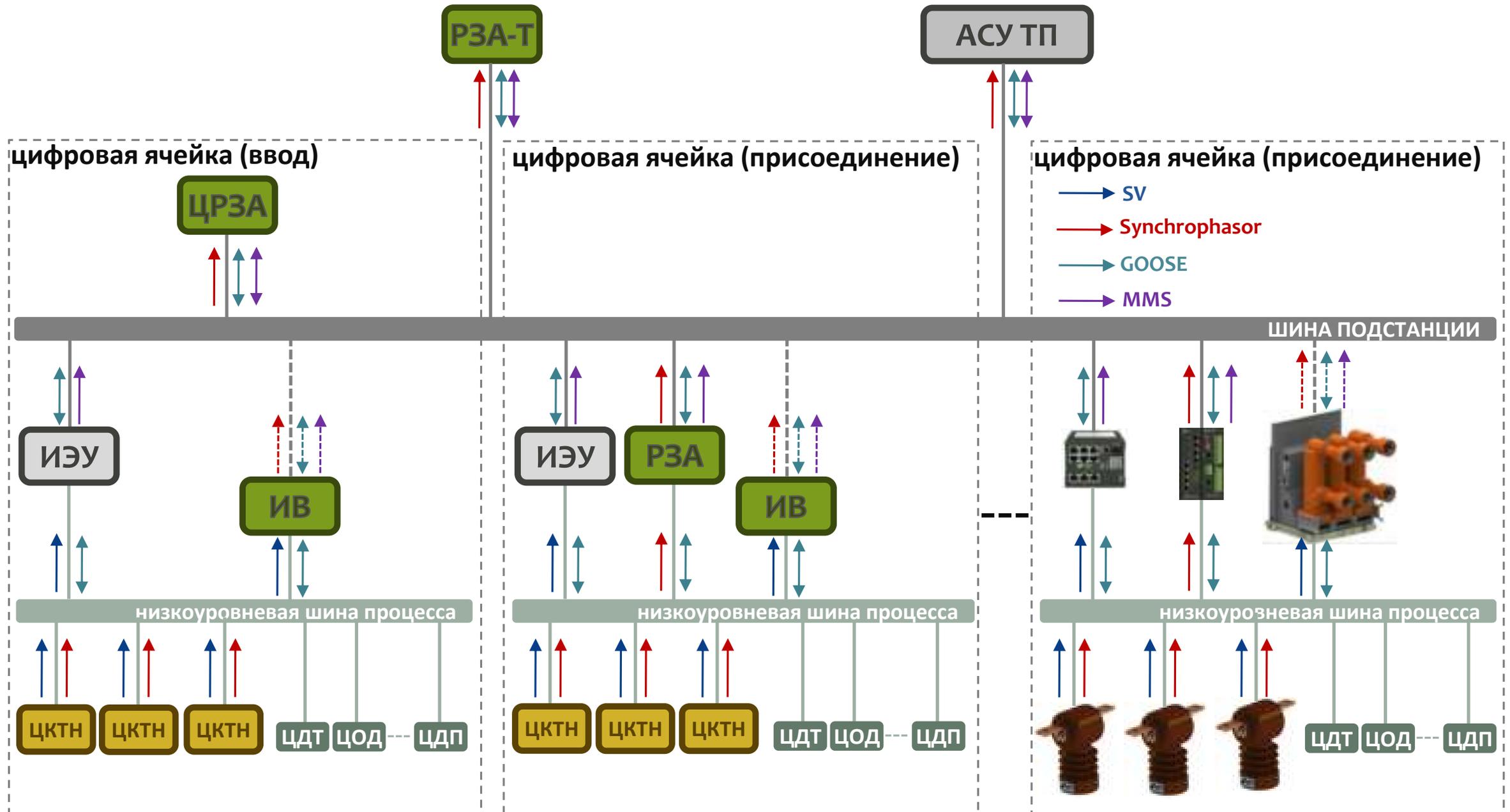
ФИФ
№73811-19
МПИ 16 лет

ENMU
NEW



Совмещенная шина процесса и шина подстанции
2 x SFP, 1G/100Mb, PRP/HSR, PTP
2 x 100 Mb





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

Благодарим за внимание!

Мокеев Алексей Владимирович

профессор Северного (Арктического) федерального университета, д.т.н.

a.mokeev@narfu.ru

зам. генерального директора ООО "Инженерный центр "Энергосервис",

a.mokeev@ens.ru, <http://www.enip2.ru>