

Сочи, 30 мая – 01 июня

Международная научно-техническая конференция

 инженерный центр
энергосервис



**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ – 2023**

**ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ
СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ,
МОНИТОРИНГА, РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

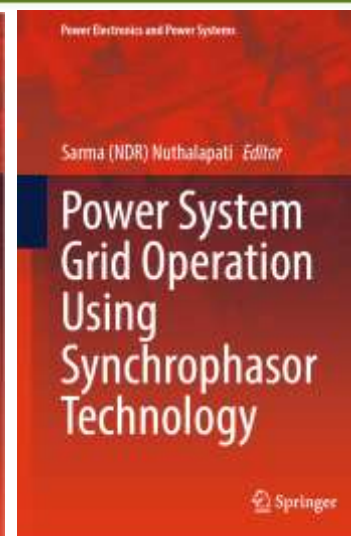
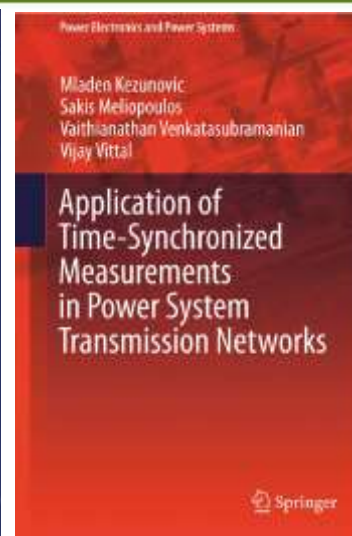
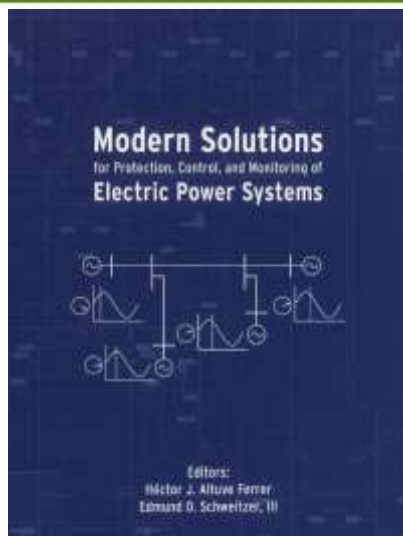
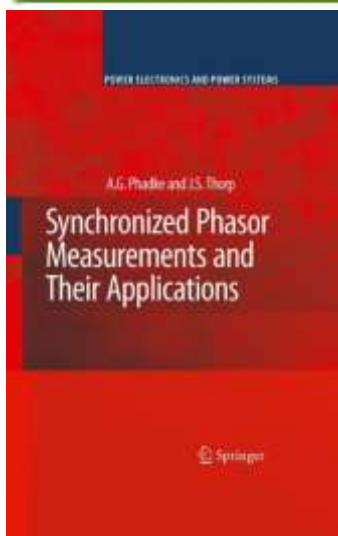
Мокеев Алексей Владимирович

Мокеев А.В.

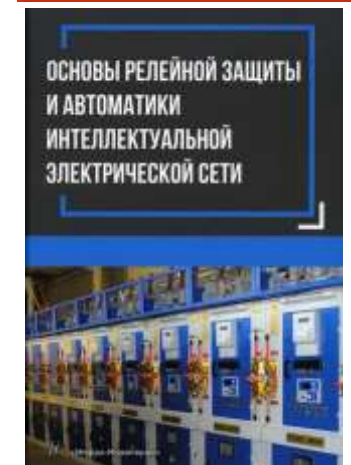
ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет

Россия

ЛИТЕРАТУРА, РЕСУРСЫ



<https://naspi.org/>, <https://ieeexplore.ieee.org/>,
<https://www.cigre.org/>, <https://www.sgsma2022.org/>



Глава 4. Технология синхронизированных векторных измерений в системах управления, защиты и автоматики

КОНФЕРЕНЦИИ



The 2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics – SGSMA, Split, Croatia, May 24h-26th 2022.

1. Technical solutions for automation of distribution networks based on SPM technology
2. Examples of processing low-frequency oscillations in Russia and ways to improve the analysis

CIGRE Session, Paris, France 2018, 2020, 2022

NASPI webinar 2021

Study Committee B5 Colloquium June 24-28, 2019 Tromsø, Norway

Релейная защита 2021

**Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики
Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко, 2021, 2022**

РЕЛАВЭКСПО 2021, 2023

Научно-практическая конференция «Релейная защита и автоматизация энергосистем. совершенствование эксплуатации и перспективы развития» на форуме «Электрические сети» 2021, 2022

**Некоммерческое партнерство «Научно-технический совет Единой энергетической системы»
2021, 2022**

ДОКЛАДЫ, СТАТЬИ



Секция 1: Концептуальные вопросы развития технологий РЗА

C1.20 Автоматизация понизительных подстанций с использованием новых технологий

Секция 4: Применение СВИ для повышения эффективности управления ЭЭС

C4.1 Развитие теории СВИ для совершенствования систем управления, мониторинга, релейной защиты и автоматики

C4.5 Автоматизация распределительных сетей на основе принципов WAMPACS

C4.10 Аспекты реализации системы определения источников НЧК

C4.11 Совершенствование алгоритмов поиска источников низкочастотных колебаний в энергосистеме

C4.14 Разработка систем управления, мониторинга, релейной защиты и автоматики на основе технологий СВИ и ЦПС

Секция 6: Разработка, проектирование, наладка и эксплуатация РЗА ЦПС

C6.7 Вопросы применения цифровых трансформаторов тока на основе катушки Роговского для высокоавтоматизированных (цифровых) подстанций



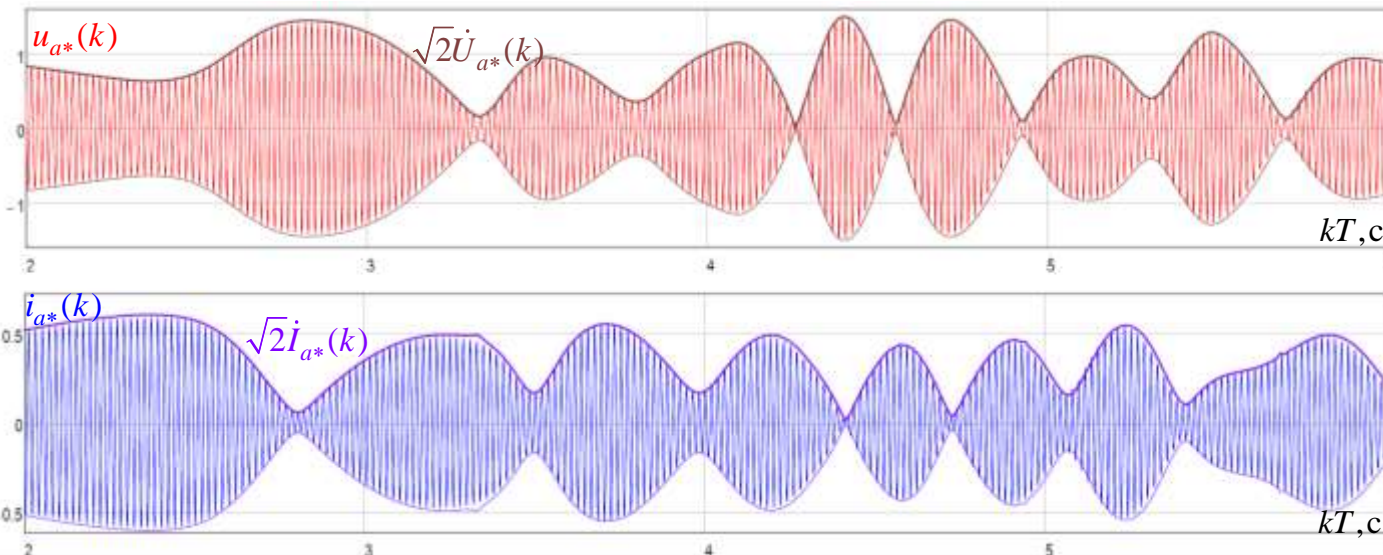
ПРЕИМУЩЕСТВА СИНХРОВЕКТОРОВ (СИНХРОФАЗОРОВ)



Синхровектор напряжения и мгновенная частота

$$\dot{U}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m(t) e^{j\varphi(t)}$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

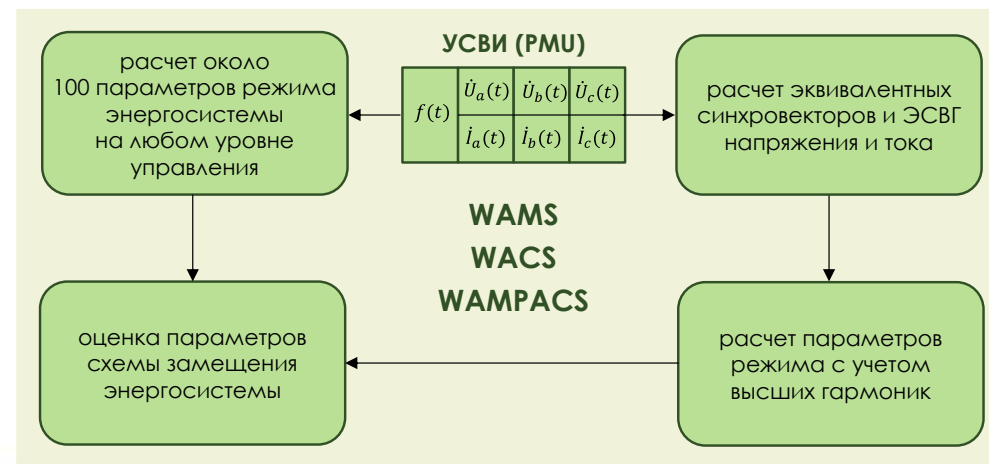


Исследование *синхровекторов электромеханических и электромагнитных переходных процессов* позволяет разработать новые алгоритмы релейной защиты, автоматики, мониторинга и управления.

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;
- внесение изменений в протокол передачи данных СВИ;
- обеспечение надежной синхронизации устройств РЗА;
- разработка новых тестов для испытаний устройств РЗА.

- точная оценка синхровекторов тока и напряжения при электромеханических переходных процессах в энергосистеме;
- высокая точность синхронизации времени (1 мкс);
- высокий темп передачи данных (≥ 50 раз/сек);
- расчет около 100 параметров режима энергосистемы на любом уровне управления;
- расчет параметров режима с учетом высших гармоник при использовании эквивалентных синхровекторов;
- оценка параметров схемы замещения энергосистемы.



СИНХРОВЕКТОРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ



Определения синхровекторов тока $\dot{I}_1(t)$ и напряжения $\dot{U}_1(t)$ при трехфазном металлическом КЗ при заданном синхровекторе ЭДС $\dot{E}_1(t)$.

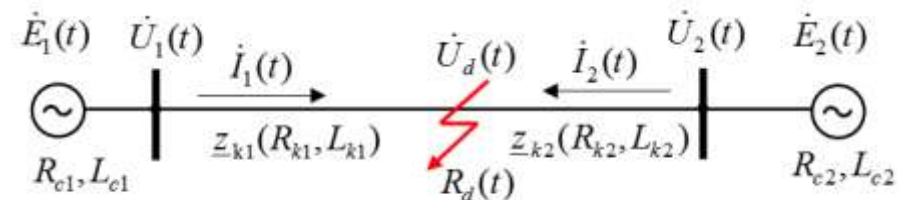


Рис. 1 а): Модель энергосистемы

№	Метод	Выражения
1	Декомпозиция ЭДС	$e_1(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{E}}_1^T e^{pt}), \dot{\mathbf{E}}_1 = [\dot{E}_n]_N = [E_{m_n} e^{-j\varphi_n}]_N, \mathbf{p} = [-\beta_n + j\omega_n]_N$ $\dot{\mathbf{I}}_1(t) = \dot{\mathbf{E}}_1 \circ Y(\mathbf{p}, t), \dot{\mathbf{I}}_{1s} = \dot{\mathbf{E}} \circ Y_0(\mathbf{p}), \dot{\mathbf{I}}_{1f} = \dot{\mathbf{E}}_1 \circ Y_1(\mathbf{p}, t),$ <p>где $Y(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau, Y(p, t) = Y_0(p) + Y_1(p, t),$</p> $\circ - \text{ операция умножения векторов, } g(t) \Leftrightarrow Y_0(p) = \frac{1}{R_{\Sigma 1} + pL_{\Sigma 1}}$
2	Частотной-временной подход	$\dot{I}_1(t) = \int_0^t \dot{E}_1(\tau) dY(j\omega_0, t - \tau) \text{ или}$ $\dot{I}_1(t) = \dot{E}_1(t) Y_0(j\omega_0) + \int_0^t Y_1(j\omega_0, \tau) d\dot{E}_1(t - \tau) + \dot{E}_1(0) Y_1(j\omega_0, t)$
3	Упрощенный частотно-временной подход	$\dot{I}_1(t) \approx \dot{E}_1(t) Y(j\omega(t), t), \dot{I}_{1s}(t) \approx \dot{E}(t) Y(j\omega(t)), \dot{I}_{1f}(t) \approx \dot{E}_1(0) Y_1(j\omega(t), t)$ <p>где $\omega(t)$ - мгновенная частота, рассчитываемая на основе $\dot{E}_1(t)$</p>
4	Решение дифференциального уравнения	$\dot{I}_1(t) = L^{-1} \int_0^t \dot{E}_1(\tau) e^{p_1(t-\tau)} d\tau, U_1(t) = z_{k1} \dot{I}_1(t) + L_{k1} \frac{d\dot{I}_1(t)}{dt}$ <p>где $p_1 = \beta_1 + j\omega_0, \beta_1 = R_{\Sigma 1} / L_{\Sigma 1}, \omega_0 = 2\pi 50 \text{ рад/с}$</p>
5	На основе интеграла свертки	$\dot{I}(t) = L^{-1} \int_0^t \dot{E}_1(t - \tau) e^{-p_1\tau} d\tau$

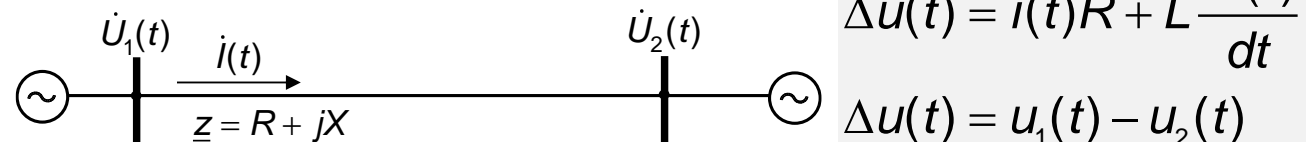
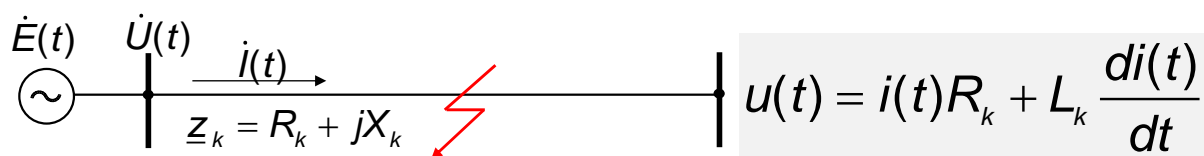
Табл. 1: Методы анализа переходных процессов

СИНХРОВЕКТОРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ



ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ, ВИРТУАЛЬНЫЙ УСВИ



Символический метод (метод комплексных амплитуд):

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

$$\dot{U} = (R_k + j\omega_0 L_k) \dot{i} = \underline{z}_k \dot{i} \quad \underline{z}_k = \frac{\dot{U}}{\dot{i}}$$

$$\Delta \dot{U} = \underline{z} \dot{i} \quad \underline{z} = \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{i}} \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \underline{z} \dot{i}$$

Синхровекторы (синхрофазоры):

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

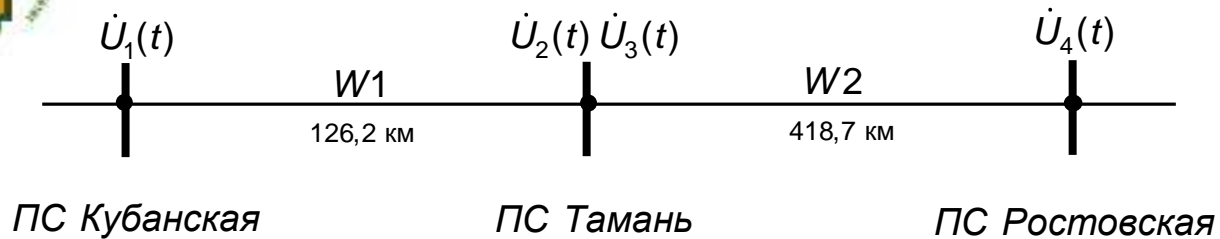
$$\dot{U}(t) = \underline{z}_k \dot{i}(t) + L_k \frac{d\dot{i}(t)}{dt} \quad \underline{z}_k \neq \frac{\dot{U}(t)}{\dot{i}(t)}$$

$$\Delta \dot{U} = \underline{z} \dot{i}(t) + L \frac{d\dot{i}(t)}{dt} \quad \underline{z} \neq \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{i}(t)} \quad \dot{U}_2 \neq \dot{U}_1 - \underline{z} \dot{i}$$

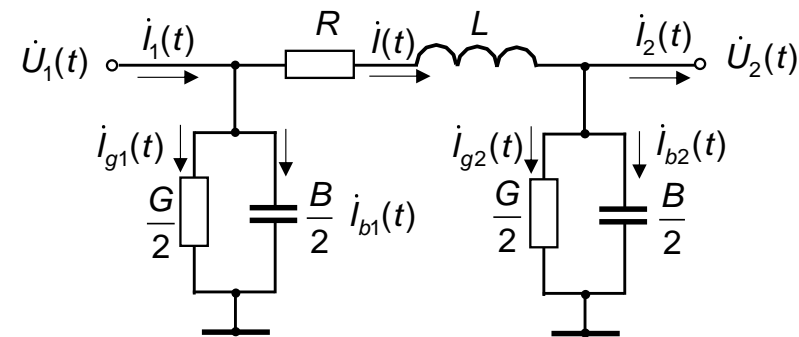
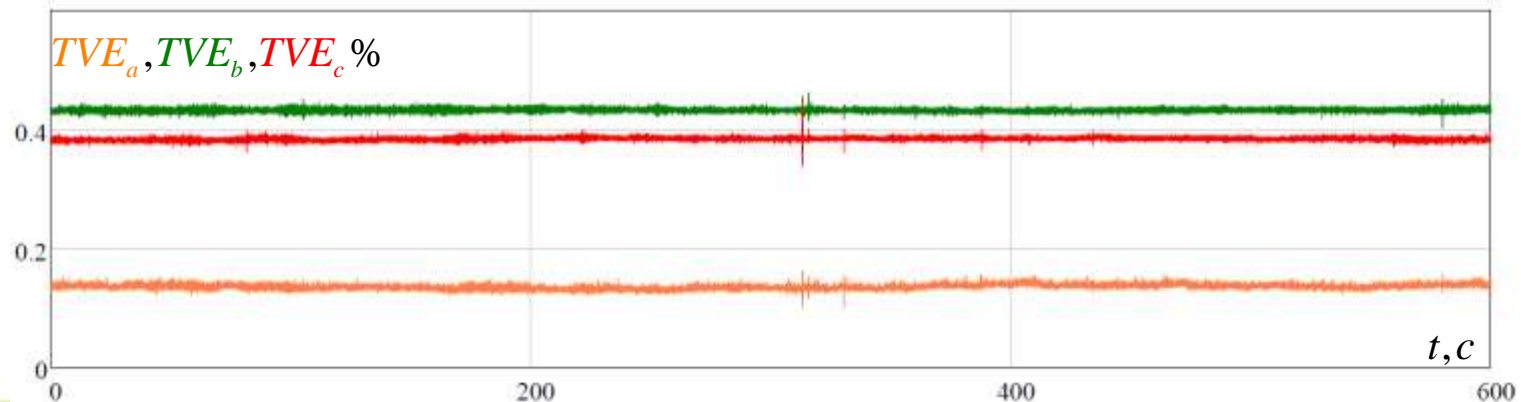
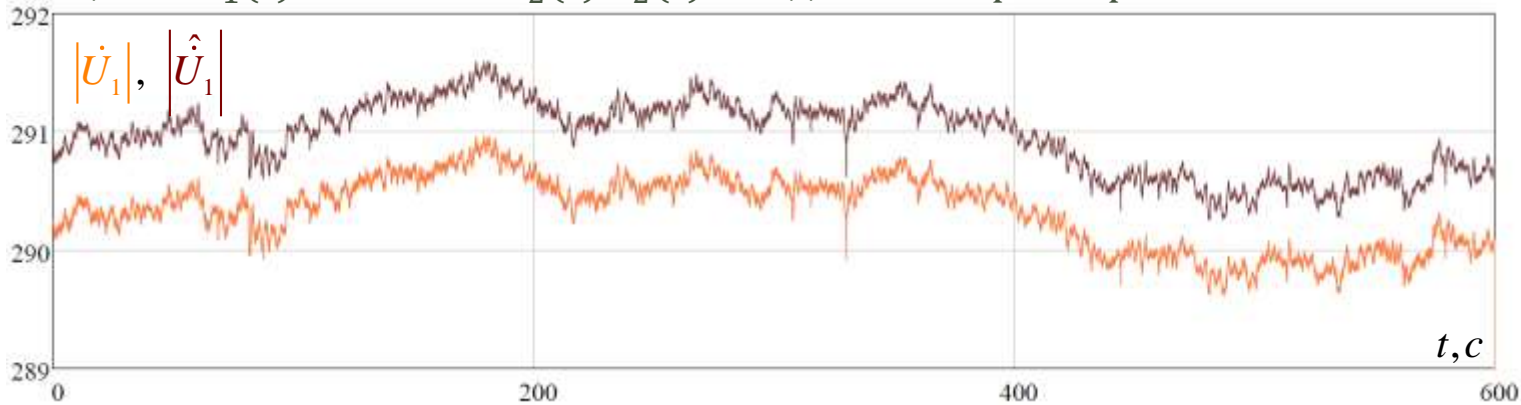
$$\hat{\underline{z}}_k(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{i}(t) + \underline{k} \dot{i}(t)}, \quad \text{где } \dot{i}(t) = \frac{d\dot{i}(t)}{dt}, \quad \underline{k} = \frac{L_{yD}}{Z_{yD}}$$

$$\hat{\underline{z}}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{i}(t) + \underline{k} \dot{i}(t)}$$

ВИРТУАЛЬНЫЙ УСВИ, ВЕРИФИКАЦИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ



Оценка $\dot{U}_1(t)$ на основе $\dot{U}_2(t)$, $\dot{I}_2(t)$ и заданных параметрах линии W1



$$\dot{I}(t) = \dot{I}_2(t) + \dot{I}_{g2}(t) + \dot{I}_{b2}(t)$$

$$\dot{I}(t) = \dot{I}_2(t) + \frac{G}{2}\dot{U}_2(t) + j\frac{B}{2}\dot{U}_2(t) + \frac{B}{2\omega_0} \frac{d\dot{U}_2(t)}{dt}$$

$$\dot{U}_1(t) = \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{I}(t) + L \frac{d\dot{I}(t)}{dt},$$

где $\underline{z} = R + j\omega_0 L$

$$\dot{I}(n) = \dot{I}_2(n) + \dot{I}_{g2}(n) + \dot{I}_{b2}(n)$$

$$\dot{I}(n) = \dot{I}_2(n) + \frac{G}{2}\dot{U}_2(n) + j\frac{B}{2}\dot{U}_2(n) + \frac{B}{2\omega_0} \nabla \dot{U}_2(n)$$

$$\dot{U}_1(n) = \dot{U}_2(n) + \underline{z}\dot{I}(n) + L\nabla \dot{I}(n)$$

ВИРТУАЛЬНЫЙ УСВИ



Поиск источника НЧК

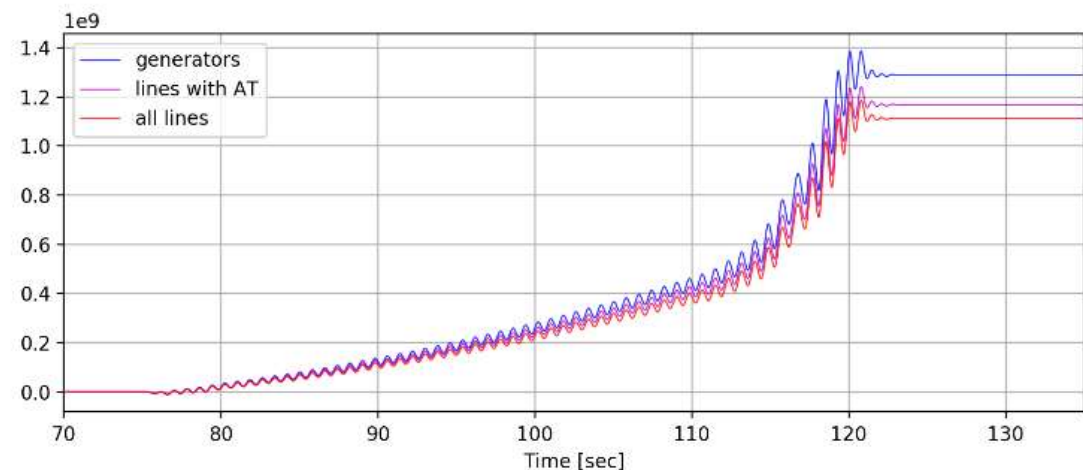
Popov I.A., Butin K.P., Dubinin D.M., Rodionov A.V., Mokeev A.V., Piskunov S.A. Examples of processing low-frequency oscillations in Russia and ways to improve the analysis // The 2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics – SG SMA, Split, Croatia, May 24h-26th 2022.

№	Метод	Выражения
1	Решение дифференциального уравнения	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \dot{E}(\tau) e^{\rho_1(t-\tau)} d\tau,$ где $\rho_1 = \beta + j\omega_0$, $\beta = (R_c + R) / (L_c + L)$, $\omega_0 = 2\pi 50$ рад/с, R_c, L_c – параметры эквивалентной энергосистемы.
2	На основе интеграла свертки	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \dot{E}(t-\tau) e^{-\rho_1 \tau} d\tau$
3	Частотной-временной подход	$i(t) = \int_0^t \dot{E}(\tau) dY(j\omega_0, t-\tau) = E(t)Y_0(j\omega_0) + \int_0^t Y_1(j\omega_0, \tau) d\dot{E}(t-\tau) + E(0)Y_1(j\omega_0, t)$ где $g(t) \leftrightarrow Y(p) = \frac{1}{R + pL}$, $Y(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau$, $Y(p, t) = Y_0(p) + Y_1(p, t)$
4	Упрощенный метод	$i(t) = \dot{E}(t)Y(j\omega(t), t), \dot{I}_1(t) = \dot{E}(t)Y(j\omega(t)), \dot{I}_2(t) = E(0)Y_1(j\omega(t), t)$ где $\omega(t)$ – мгновенная частота, рассчитываемая на основе $\dot{E}(t)$

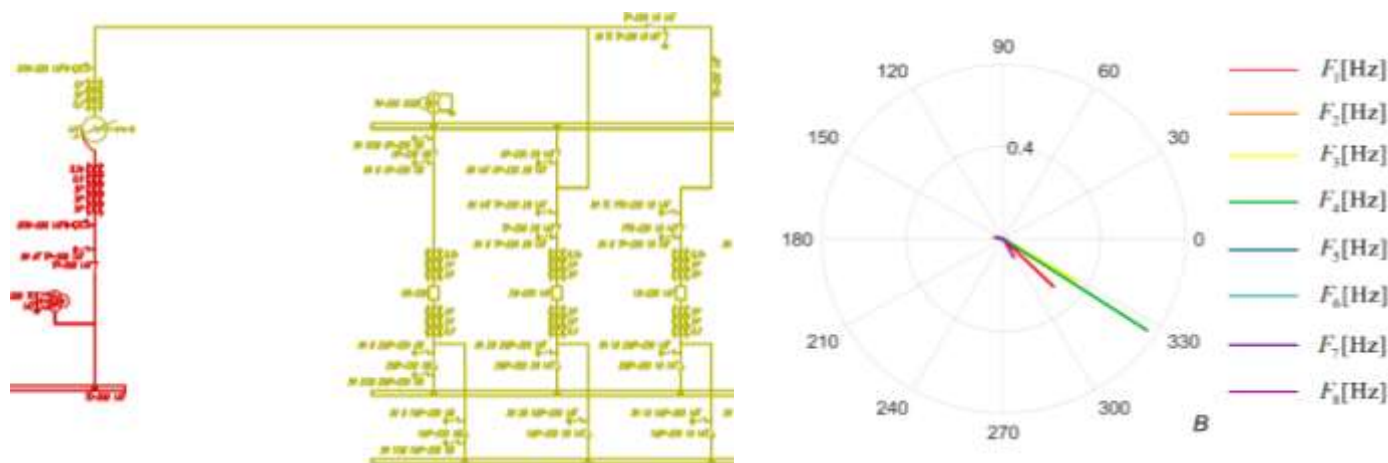


№	Метод	Выражения
1	Решение разностного уравнения	$i(n) = \frac{T}{L} \sum_{m=0}^n \Delta U(n-m) e^{\rho_1(n-m)T}$
2	На основе свертки	$i(n) = \frac{T}{L} \sum_{m=0}^n \Delta U(n-m) e^{-\rho_1 m T}$
3	Частотной-временной подход	$i(n) = \Delta U(n)Y_0(j\omega_0) + T \sum_{m=0}^n Y_1(j\omega_0, m) \Delta U'(n-m) + \Delta U(0)Y_1(j\omega_0, n)$
4	Упрощенный метод	$i(n) \approx \Delta U(n)Y(j\omega(n), nT), \dot{I}_1(n) \approx \Delta U(n)Y(j\omega(n)), \dot{I}_2(n) \approx \Delta U(0)Y_1(j\omega(n), nT)$

The Dissipating Energy Flow (DEF) method



Mode shape estimation (MSE)

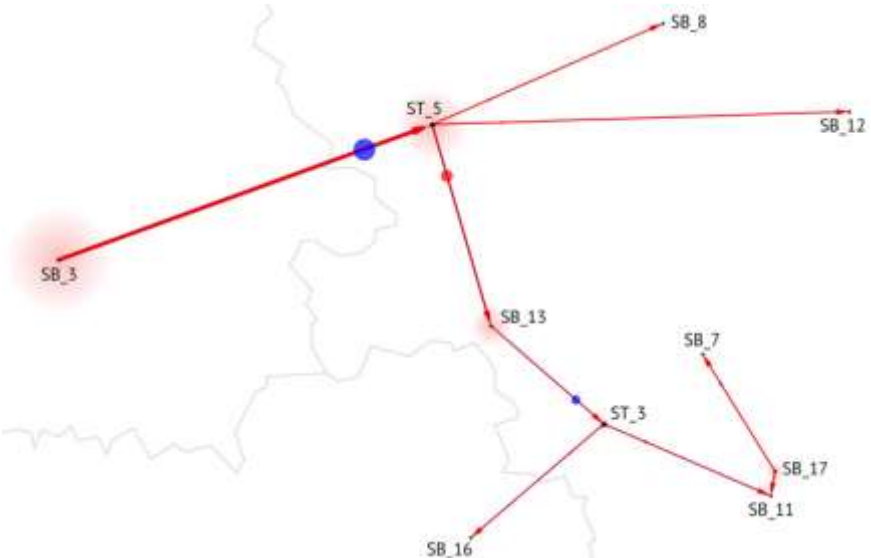
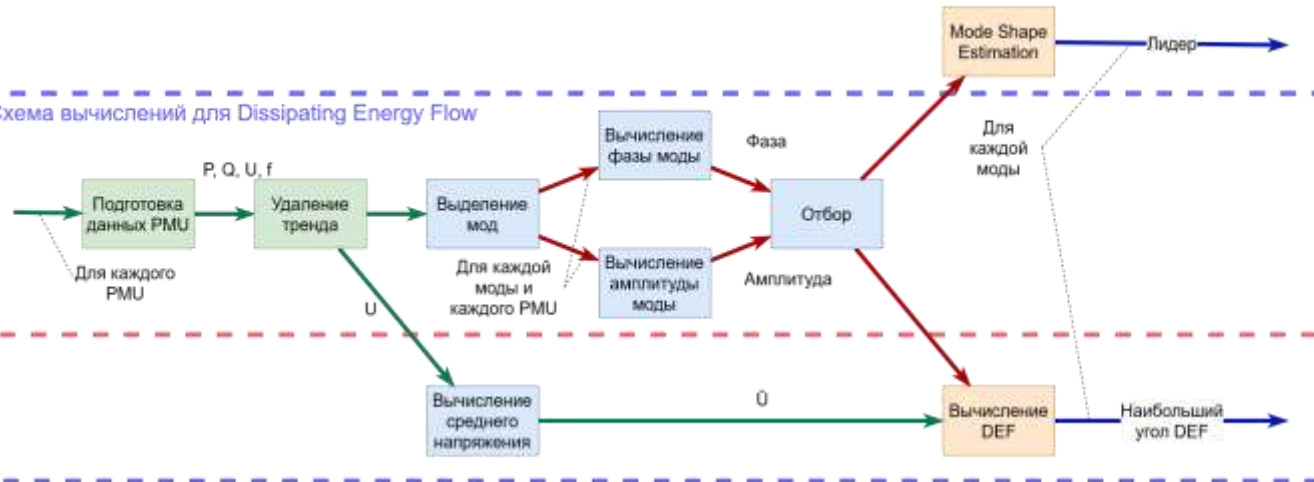


МОНИТОРИНГ НЧК: ПО ES PHASOR



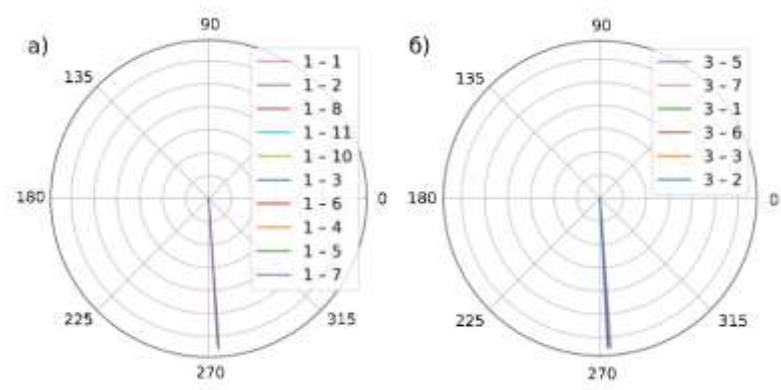
Схема вычислений для Mode Shape Estimated

Схема вычислений для Dissipating Energy Flow

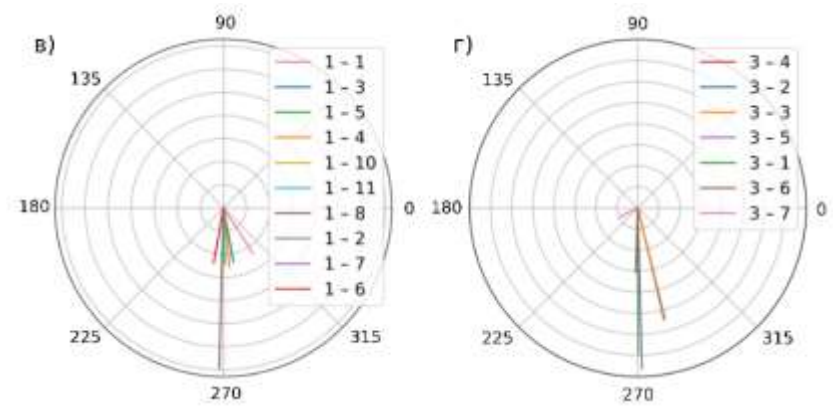


результат вычислений –
в виде карты контролируемых объектов

MSE по частоте из U



MSE по частоте из I



МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА



СМСТ на базе СВИ

моделирование

промышленная эксплуатация

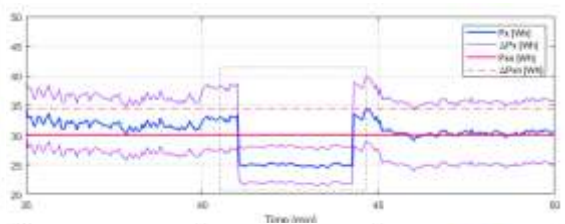
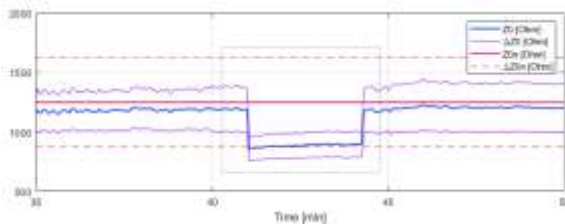
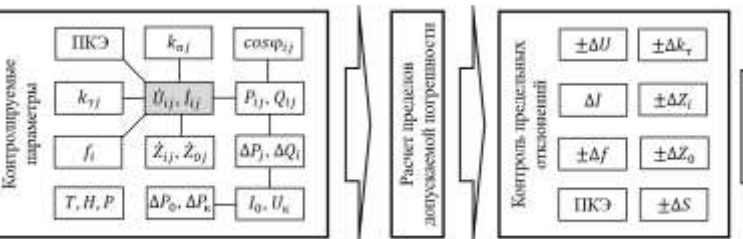
физическое на лабораторном стенде

математическое в среде MATLAB/Simulink

СМСТ на базе СВИ установлена на двух подстанциях ПАО «МРСК Северо-Запада»



*с учетом номинальной мощности установленных силовых трансформаторов



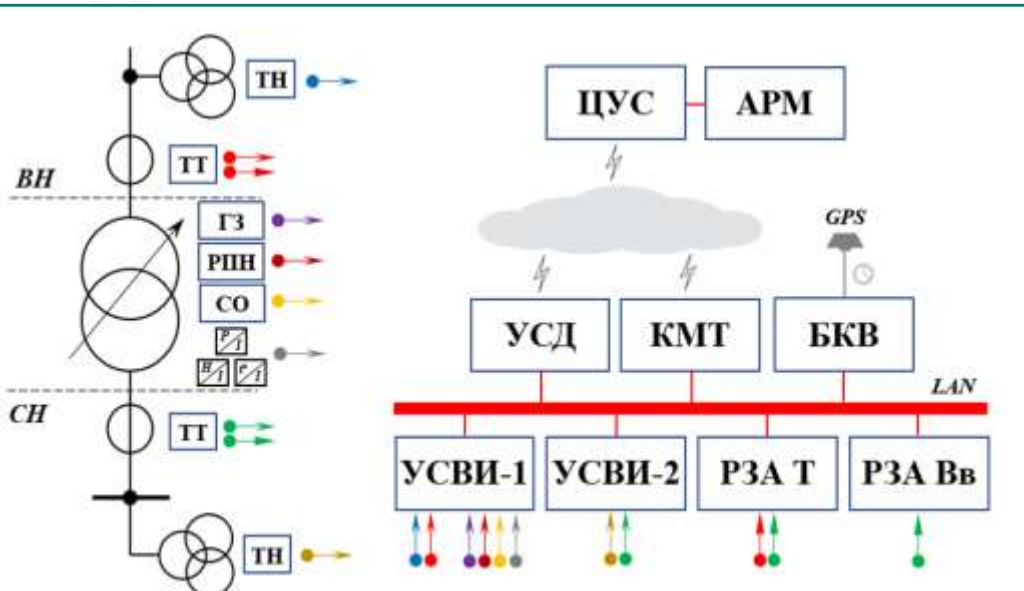
Параметр	Область переключения r X, %			Отклонения ΔX, %			Градиент [град/Г]			Уровень
	До	ВЗ	После	До	ВЗ	После	До	ВЗ	После	
u _n	100,0	100,0	100,0	-0,199	-0,331	-0,201	0,000	0,014	0,000	2
u _{нн}	80,0	61,7	73,3	9,706	11,598	10,653	0,049	0,257	0,039	2
P _н	88,4	91,8	87,0	17,301	17,051	18,686	0,438	0,853	0,411	1
P _л	100,0	0,0	100,0	0,526	-16,838	11,254	0,468	8,569	4,228	3
φ	82,1	100,0	89,7	14,191	3,863	15,713	0,795	8,279	1,672	2
-I _н	69,3	24,4	73,8	4,512	40,42	3,326	0,040	7,111	0,161	2
-I _л	47,6	35,4	57,8	8,630	10,957	9,499	0,037	0,164	0,025	2
Z _н	100,0	63,8	100,0	-4,067	-28,757	-1,685	11,981	370,731	72,595	2



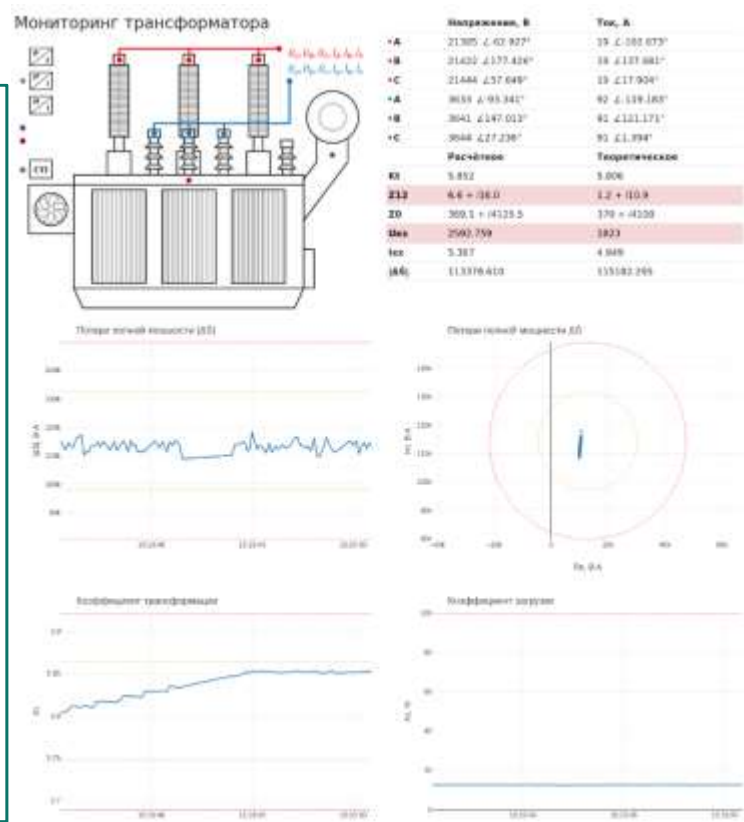
- Функции СМСТ на базе СВИ
- оценка параметров схемы замещения
 - контроль перегрузочной способности
 - контроль сквозных токов КЗ, БТН
 - оценка степени износа витковой изоляции
 - контроль работы РПН, системы охлаждения
 - контроль параметров окружающей среды
 - энергомониторинг (учет электроэнергии)
 - измерение и контроль ПКЭ
 - телеизмерение, телесигнализация



МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА



ГЗ – газовая защита; РПН – контроль положения РПН; СО – контроль работы системы охлаждения; Р/1, Н/1, t/1 – 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



УСВИ с КВД, МИП ТМ



УСВИ, МИП ТМ, счетчик, прибор ПКЭ



РПН, охлаждение, окр. среда



УСД, БКВ

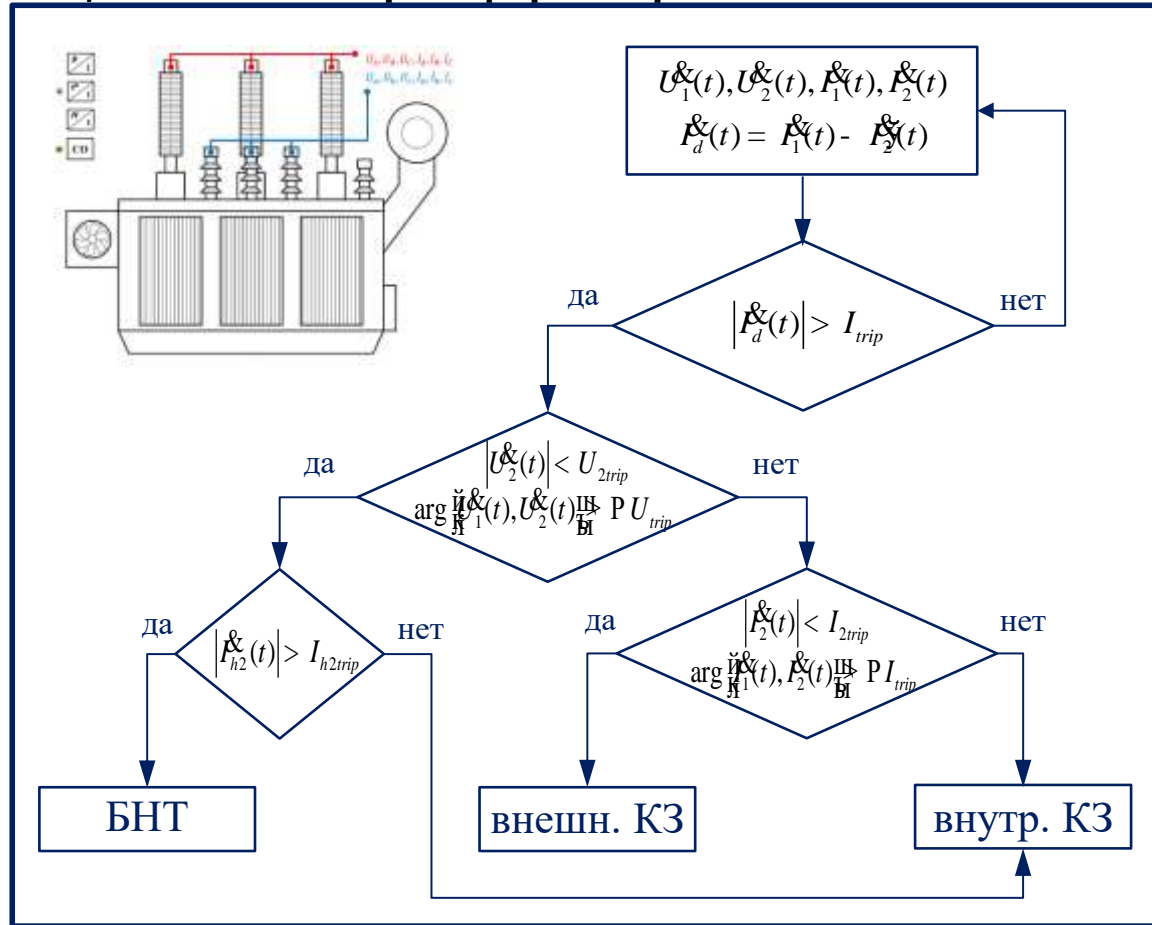


КМТ

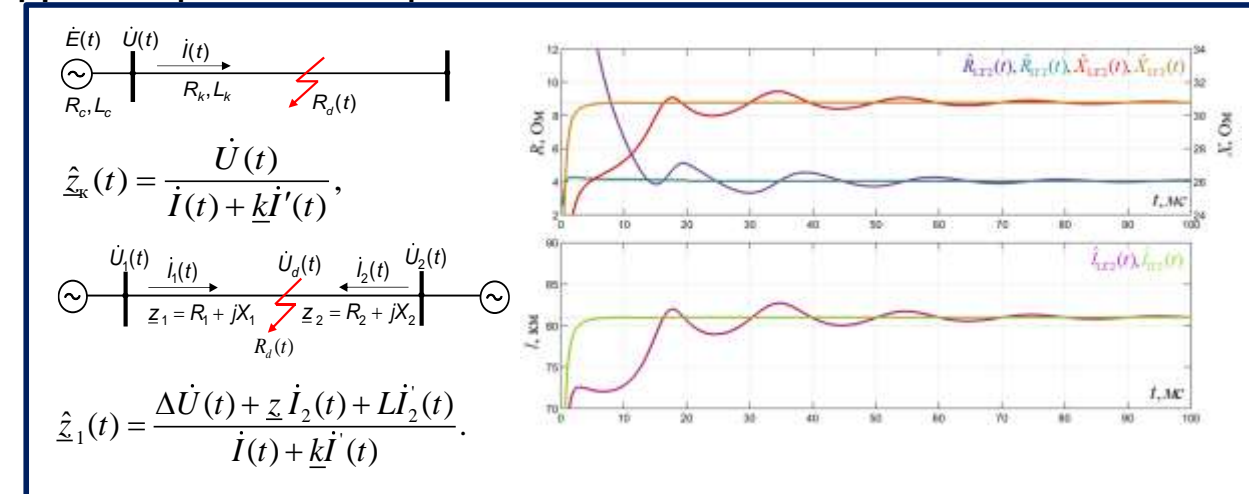
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА



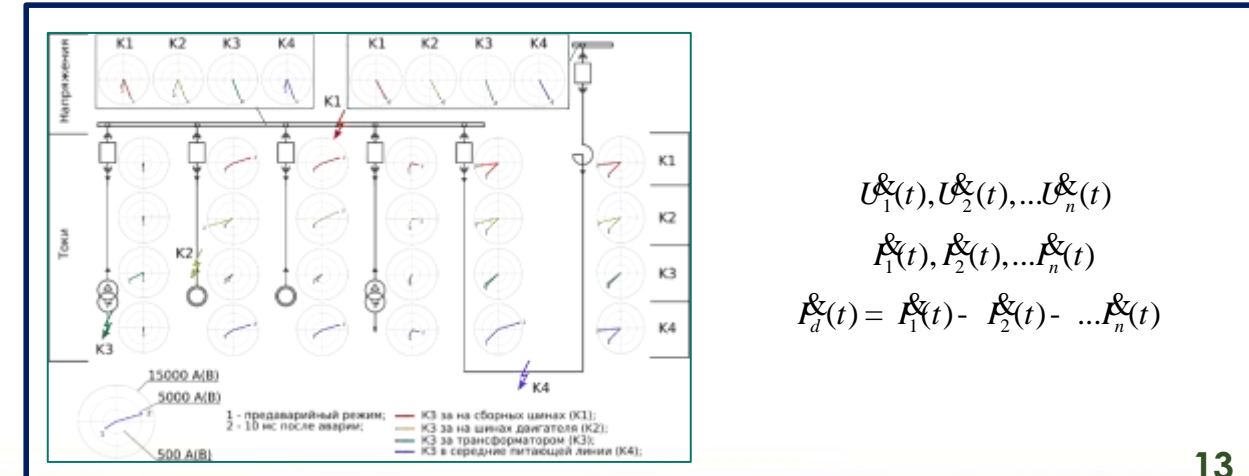
Защита силового трансформатора



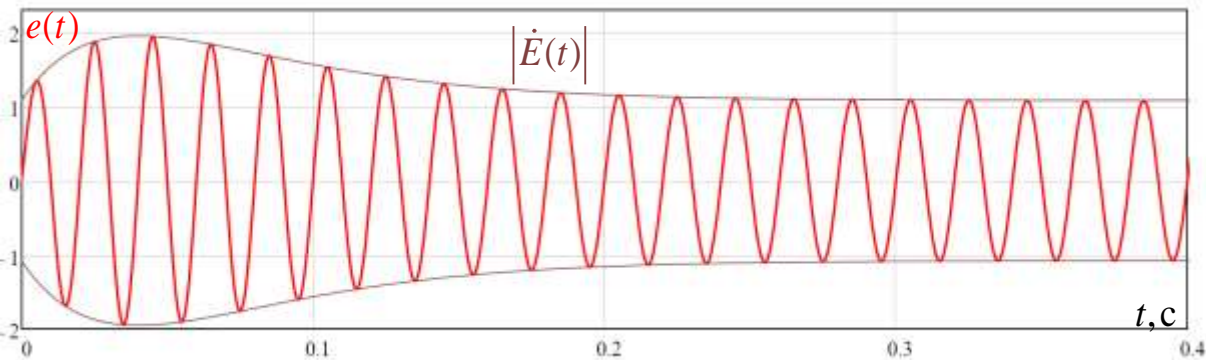
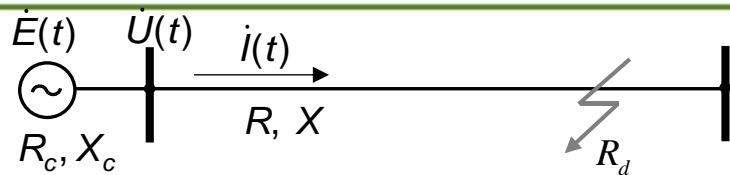
Дистанционная защита линии



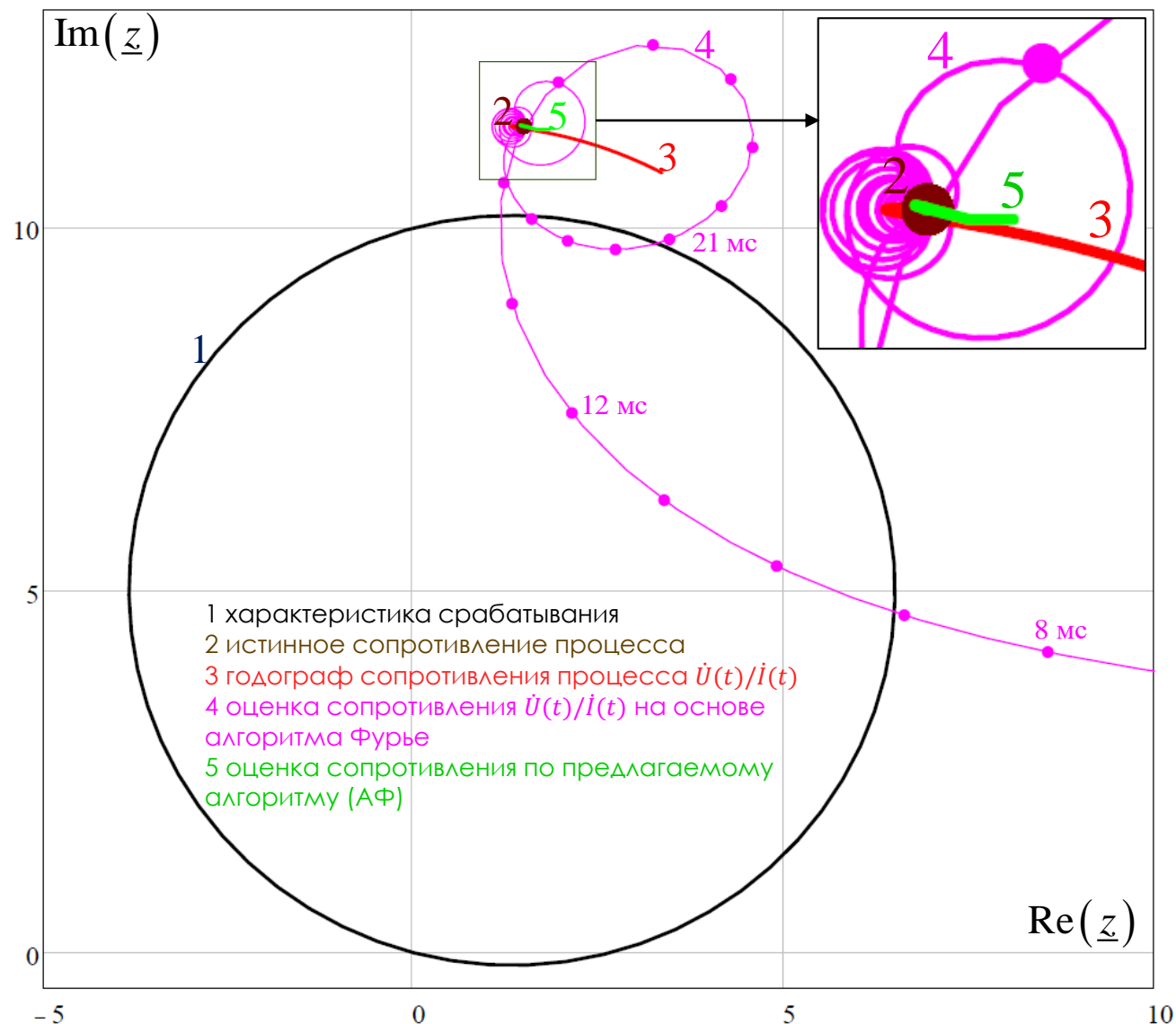
Дифференциальная защита сборных шин



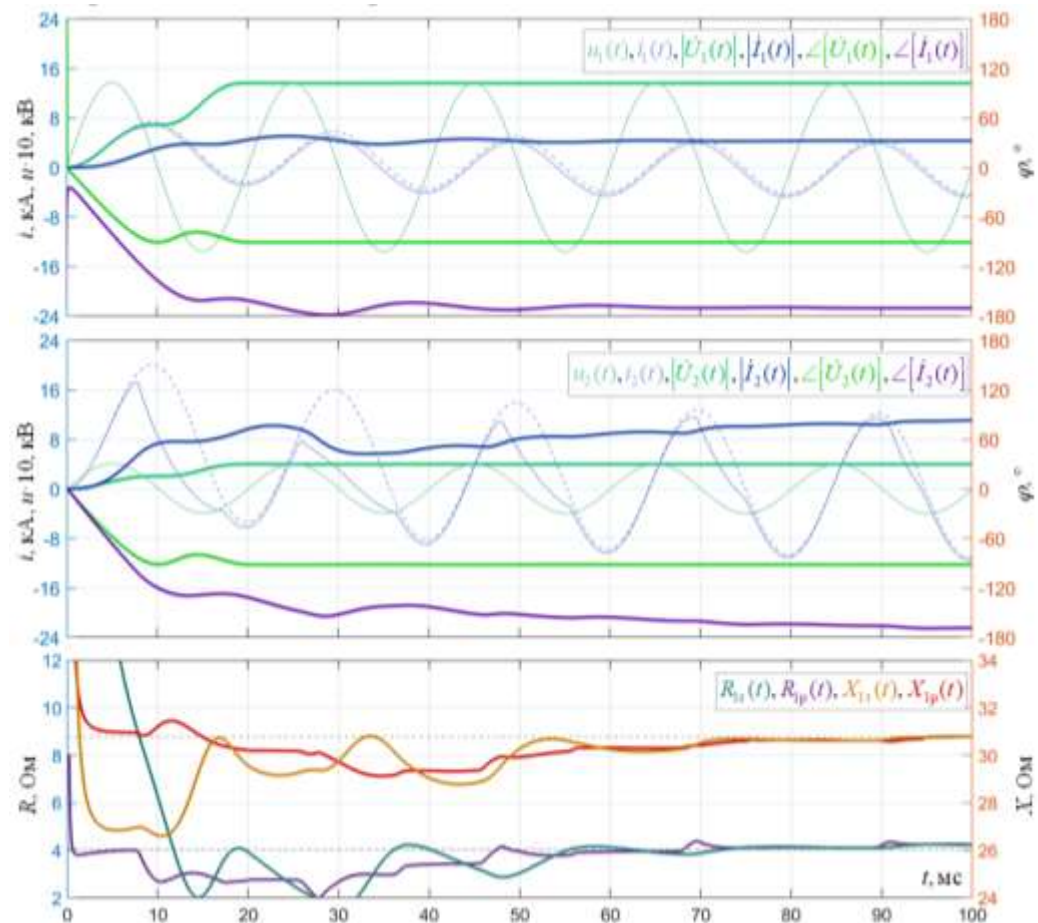
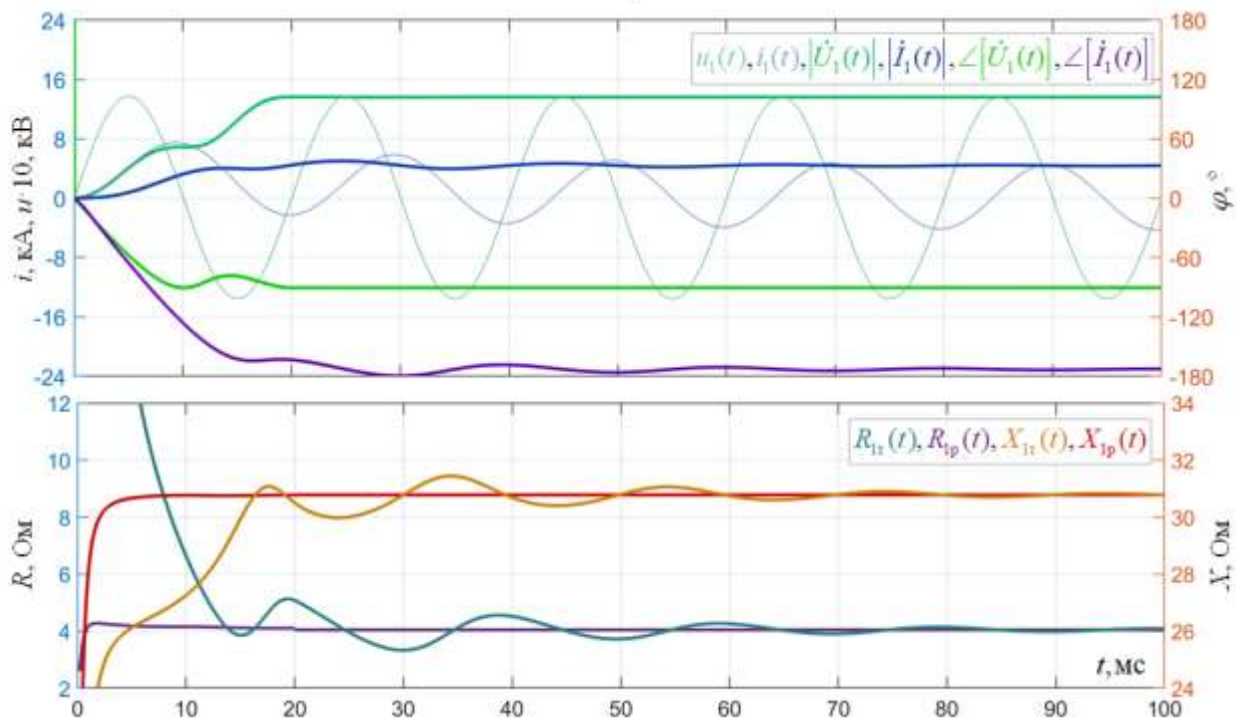
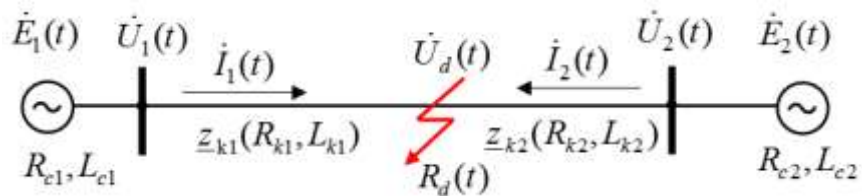
ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА



№	Наименование	Выражение
1	Дифференциальное уравнение линии	$u(t) = i(t)R_{\Sigma} + L \frac{di(t)}{dt}, R_{\Sigma} = R + R_d$
2	Оценка комплексного сопротивления	$\hat{z}_{\Sigma}(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + k\dot{I}'(t)}, \text{ где } \dot{I}'(t) = \frac{d\dot{I}(t)}{dt},$ $\underline{z}_{\Sigma}(t) = \underline{z} + R_d, k = L_{уд}/z_{уд}$
3	Оценка параметров петли КЗ	$\hat{L}(t) = \text{Im}(\hat{z}_{\Sigma}(t)), \hat{R}_{\Sigma}(t) = \text{Re}(\hat{z}_{\Sigma}(t))$
4	Оценка сопротивления дуги	$\hat{R}_d(t) = \hat{R}_{\Sigma}(t) - \hat{L}(t) \frac{R_{уд}}{L_{уд}}$
5	Оценка активного сопротивления	$\hat{R}(t) = \hat{R}_{\Sigma}(t) - \hat{R}_d(t).$



ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА



Оценка сопротивления петли КЗ со стороны 1-й энергосистемы
 $\dot{I}_1(t) \neq \dot{I}_2(t)$

$$\hat{z}_1(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + z_{\text{уд}} \dot{I}_2(t) + L_{\text{уд}} \dot{I}_2'(t)}{\dot{I}(t) + k_1 \dot{I}'(t)}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}(t) &= \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t), \\ \dot{I}(t) &= \dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t), \\ \dot{I}'(t) &= \dot{I}_1'(t) + \dot{I}_2'(t) \end{aligned}$$



РАБОТА ДЗ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

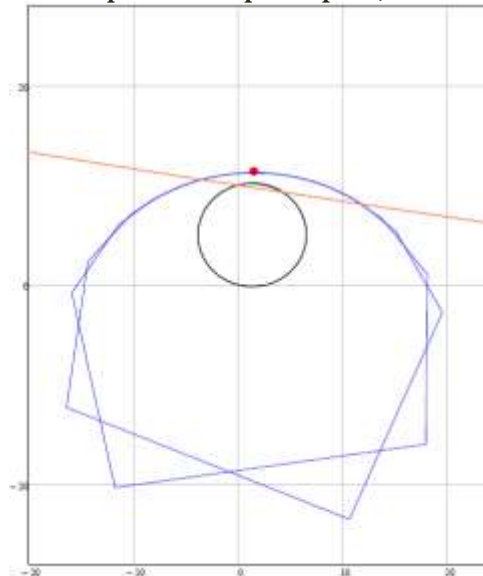
Традиционный алгоритм ДЗ

$$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t)} = z_{12} \frac{(\omega_0 + \Delta\omega)(\dot{E}e^{j\Delta\omega t} - \dot{E}_0)}{\omega_0 \dot{E}e^{j\Delta\omega t} - (\omega_0 + \Delta\omega)\dot{E}_0}$$

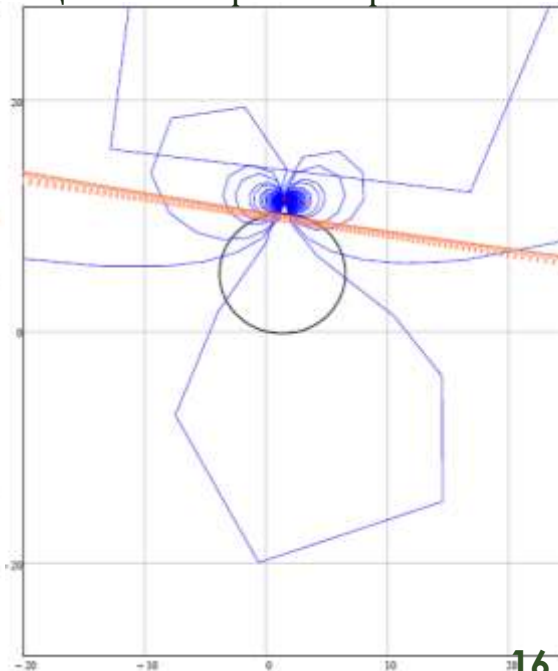
Предлагаемый алгоритм

$$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + k\dot{I}'(t)} = z_{12}$$

синхровекторы процессов



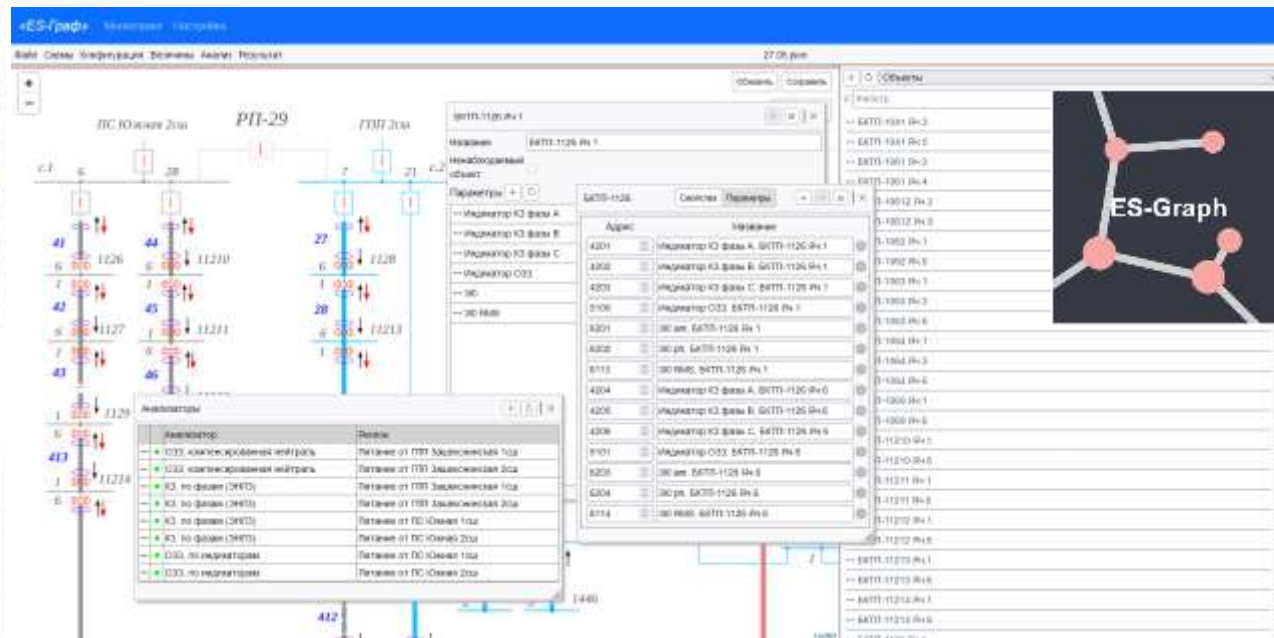
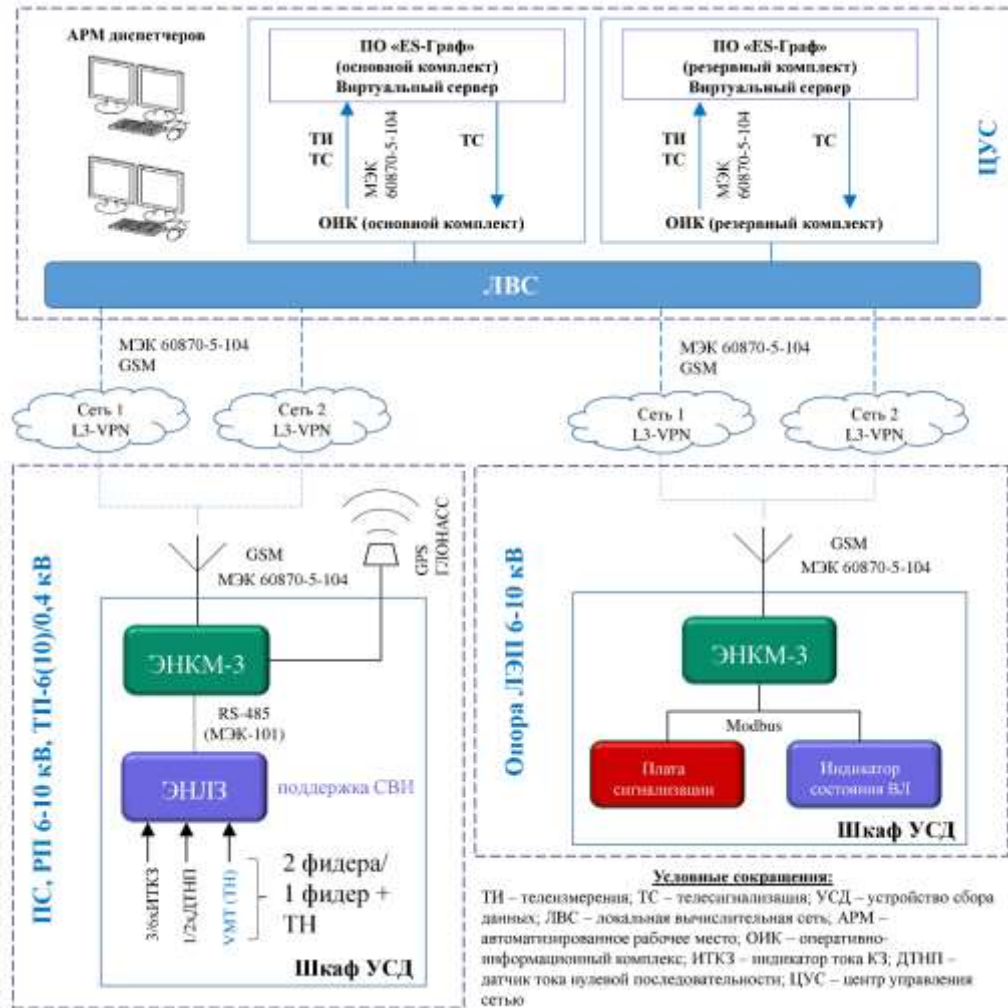
оценка синхровекторов



№	Наименование	Выражение
1	Энергосистема	<p>236 кВ $\omega_1 = 2\pi \cdot 45$ рад/с $Z_{s1} = 12 + j12,8$ Ом</p> <p>231 кВ $\omega_0 = 2\pi 50$ рад/с $Z_{s0} = 0$</p>
2	ДУ	$\Delta e(t) = R_{03}i(t) + L_{03} \frac{di(t)}{dt}$
3	Синхровекторы	$\dot{E}_1(t) = \dot{E}e^{j\Delta\omega t}$, $\Delta \dot{E}(t) = \dot{E}_1(t) - \dot{E}_0$, $\Delta\omega = -2\pi 5$ рад/с
4	Подстанция в ДУ	$\Delta \dot{E}(t) = z_{03} \dot{I}(t) + L_{03} \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$
5	Неоднородное ДУ	$\frac{d\dot{I}(t)}{dt} + p_{03}\dot{I}(t) = \frac{1}{L_{03}} \Delta \dot{E}(t)$, где $p_{03} = \beta_{03} + j\omega_0$, $\beta_{03} = \frac{R_{03}}{L_{03}}$
6	Синхровектор тока	$\dot{I}(t) = \frac{1}{L_{03}} e^{-p_{03}t} \int_0^t \Delta \dot{E}(\tau) e^{p_{03}\tau} d\tau$
7	Принужденная компонента $\dot{I}(t)$	$\dot{I}_p(t) = \frac{\dot{E}}{z_{\Delta 03}} e^{j\Delta\omega t} - \frac{\dot{E}_0}{z_{03}}$, где $z_{\Delta 03} = R_{03} + j(\omega + \Delta\omega)L_{03}$
8	Синхровектор напряжения $\dot{U}_{1p}(t)$	$\dot{U}_{1p}(t) = \dot{E}_1(t) - z_{01}\dot{I}_p(t) - L_{01} \frac{d\dot{I}_p(t)}{dt} = \left(1 - \frac{z_{01}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{01}}{z_{\Delta 03}}\right) \dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{01}}{z_{03}} \dot{E}_0$
9	Синхровектор напряжения $\dot{U}_{2p}(t)$	$\dot{U}_{2p}(t) = \dot{U}_{1p}(t) - z_{12}\dot{I}_p(t) - L_{12} \frac{d\dot{I}_p(t)}{dt} = \left(1 - \frac{z_{02}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{02}}{z_{\Delta 03}}\right) \dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{02}}{z_{03}} \dot{E}_0$
10	Разность синхровекторов напряжений	$\Delta \dot{U}_p(t) = \dot{U}_{1p}(t) - \dot{U}_{2p}(t) = \left(\frac{z_{12}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{12}}{z_{\Delta 03}}\right) \dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{12}}{z_{03}} \dot{E}_0$

Табл. 4: Синхровекторы тока и напряжения при асинхронном режиме

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЕТИ СН



Особенности УСВИ для распределительных сетей (ЭНЛЗ):

1. подключение к 2 кабельным линиям;
2. низкая стоимость;
3. параметры:

Диапазон измерений, А	Амплитудная погрешность, %	Угловая погрешность, мин	TVE, %
0,5 – 1,2	5	240	7
1,2 – 3,0	3	180	5
3,0 – 70	2	60	2



ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЕТИ СН

Алгоритм локализации

Синхровекторы тока НП на участках сети
Синхровекторы напряжения НП на секциях РП/ПС

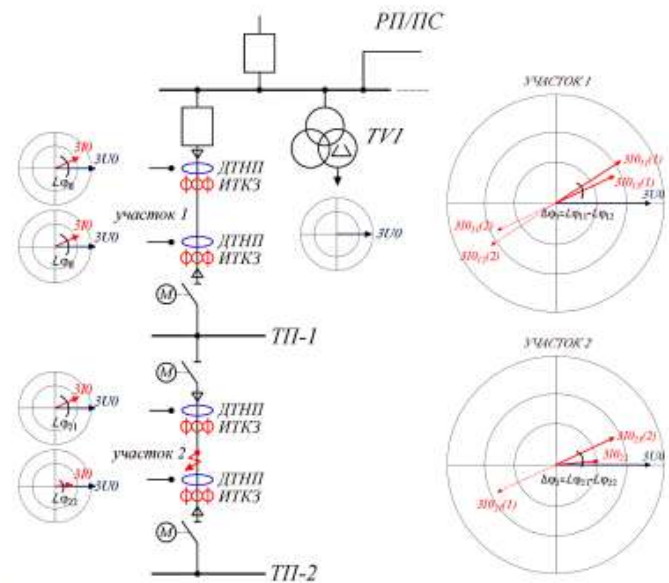
Расчет фазового сдвига между синхровекторами токов НП
в начале и конце участков: $\Delta\varphi_n = \varphi_n^H - \varphi_n^K$

Определение максимального модуля синхровектора тока НП
по участкам сети: $I_{0nmax} = \max\{I_n^H, I_n^K\}$

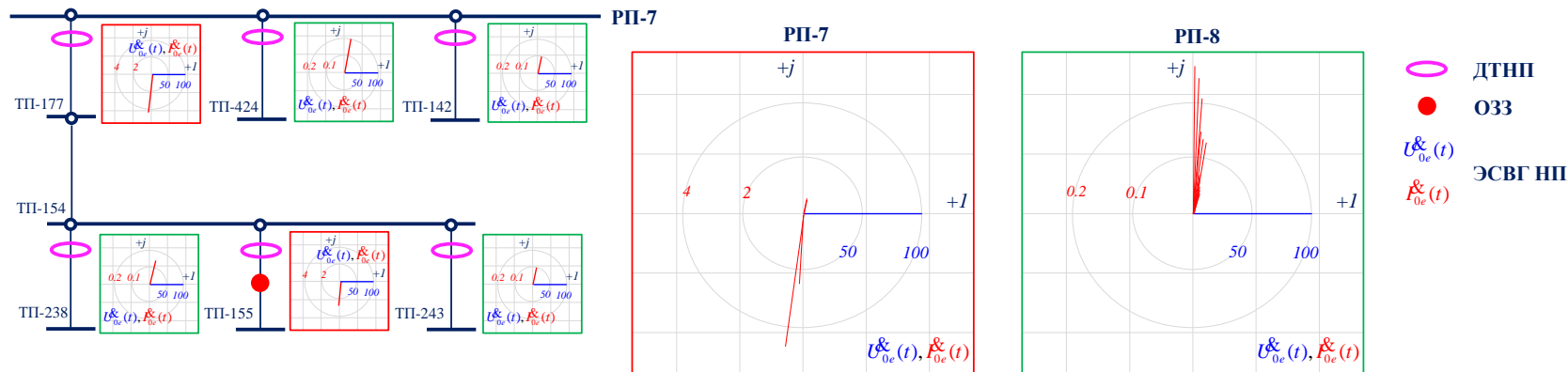
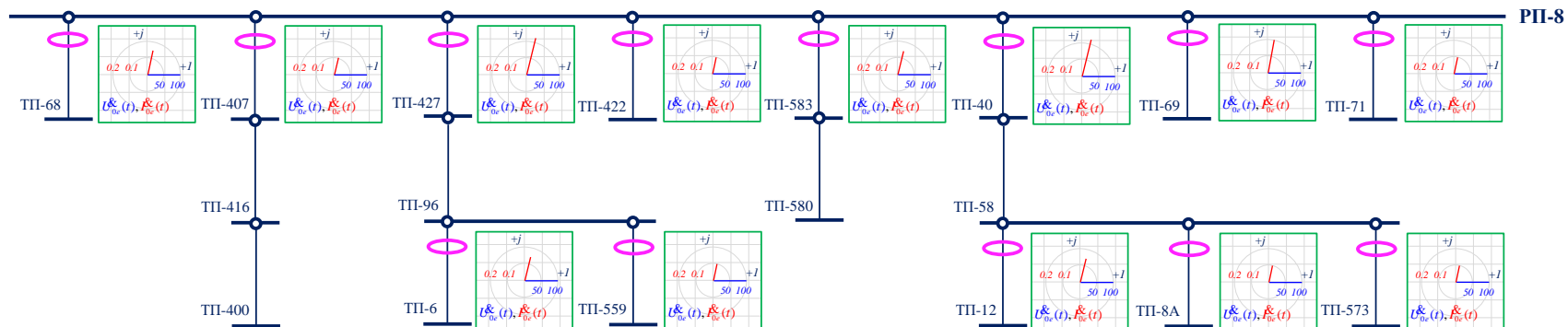
Расчет угловой характеристики участков сети:

$$\psi_{\Delta n} = \Delta\varphi_n \frac{I_{0nmax}}{I_{0b}}$$

Определение поврежденного участка по максимальному
значению угловой характеристики $\psi_{\Delta n}$



Новый алгоритм направленной защиты от ОЗЗ, основанный на использовании эквивалентных синхровекторов напряжения и тока нулевой последовательности высших гармоник



- ДТНП
- ОЗЗ
- $\dot{U}_{0e}(t)$
- $\dot{I}_{0e}(t)$

Оценка емкости в сети с изолированной нейтралью:

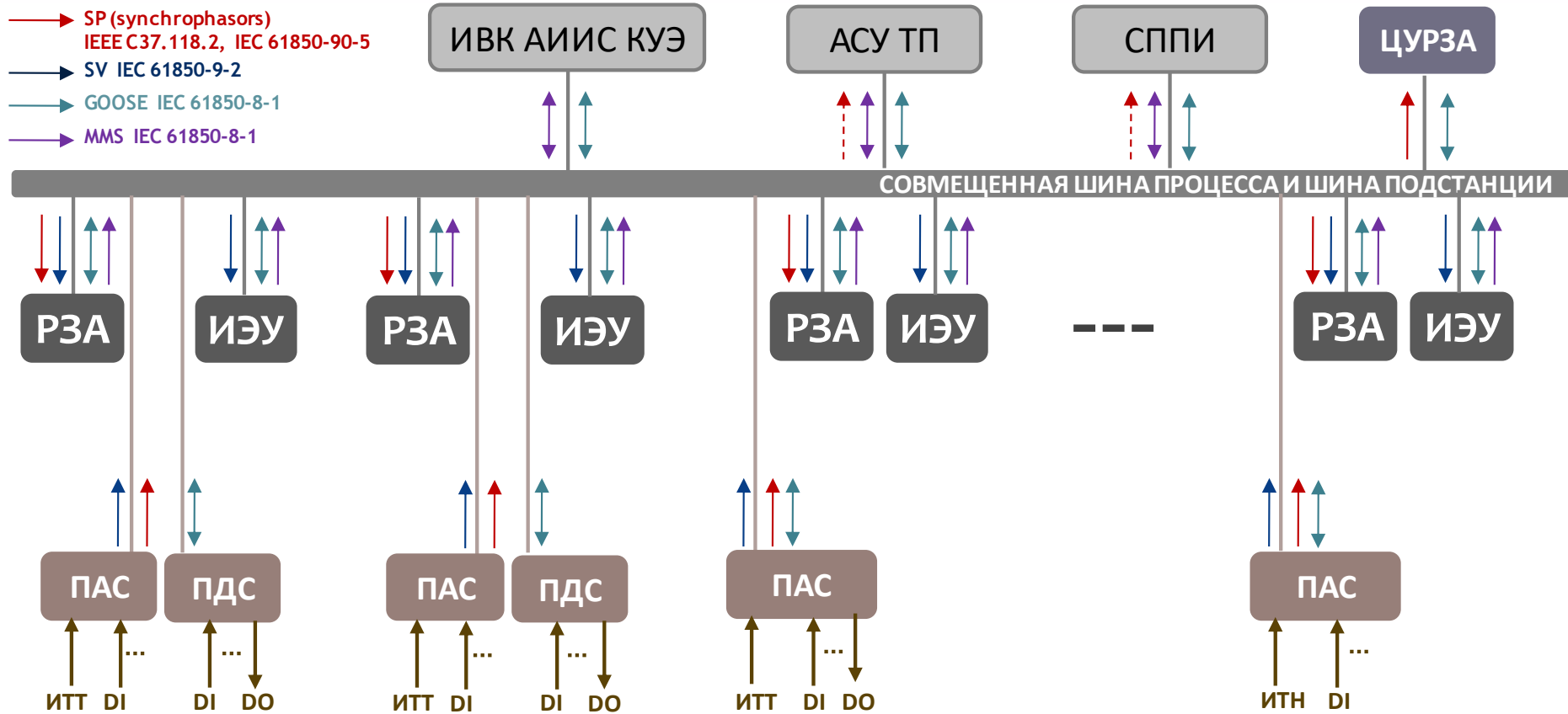
$$\hat{C}_0(t) \approx \frac{3\dot{I}_0(t)}{j\omega_0\dot{U}_0(t) + \dot{U}_0'(t)}$$

Оценка емкости в сети с компенсацией:

$$\hat{C}_0(t) = -\frac{j\omega_0\dot{I}_0(t) + \dot{I}_0'(t) + L_k^{-1}\dot{U}_0(t)}{3\dot{U}_0''(t) + (j2\omega_0 + k)\dot{U}_0'(t) - (\omega_0^2 - j\omega_0k)\dot{U}_0(t)}, \quad k = \frac{G_0}{C_0} = \frac{G_{0уд}}{C_{0уд}}$$



ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВИ И ЦПС



ENMU
с 2019
года

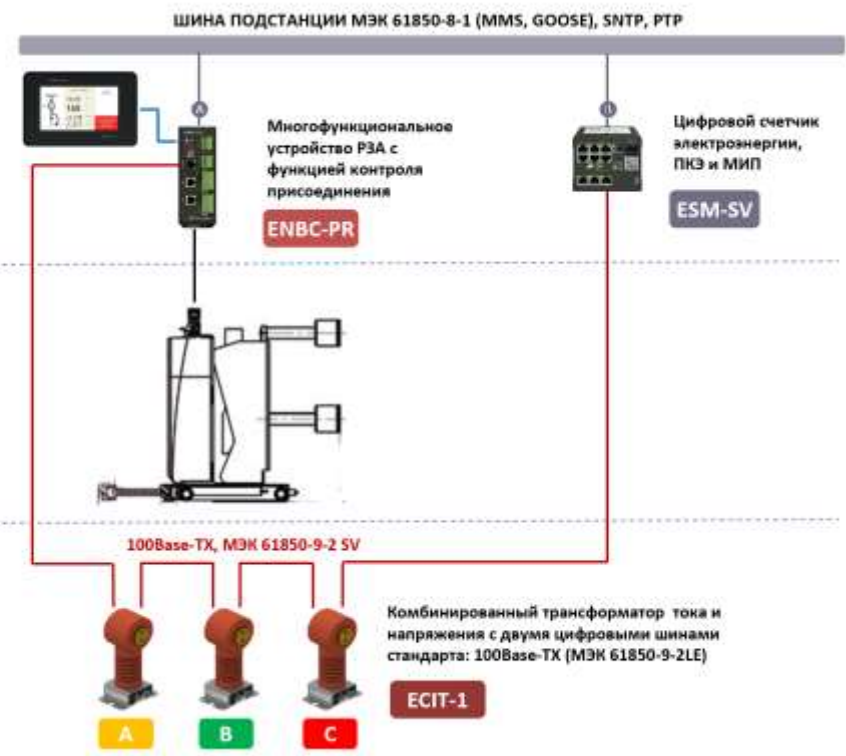
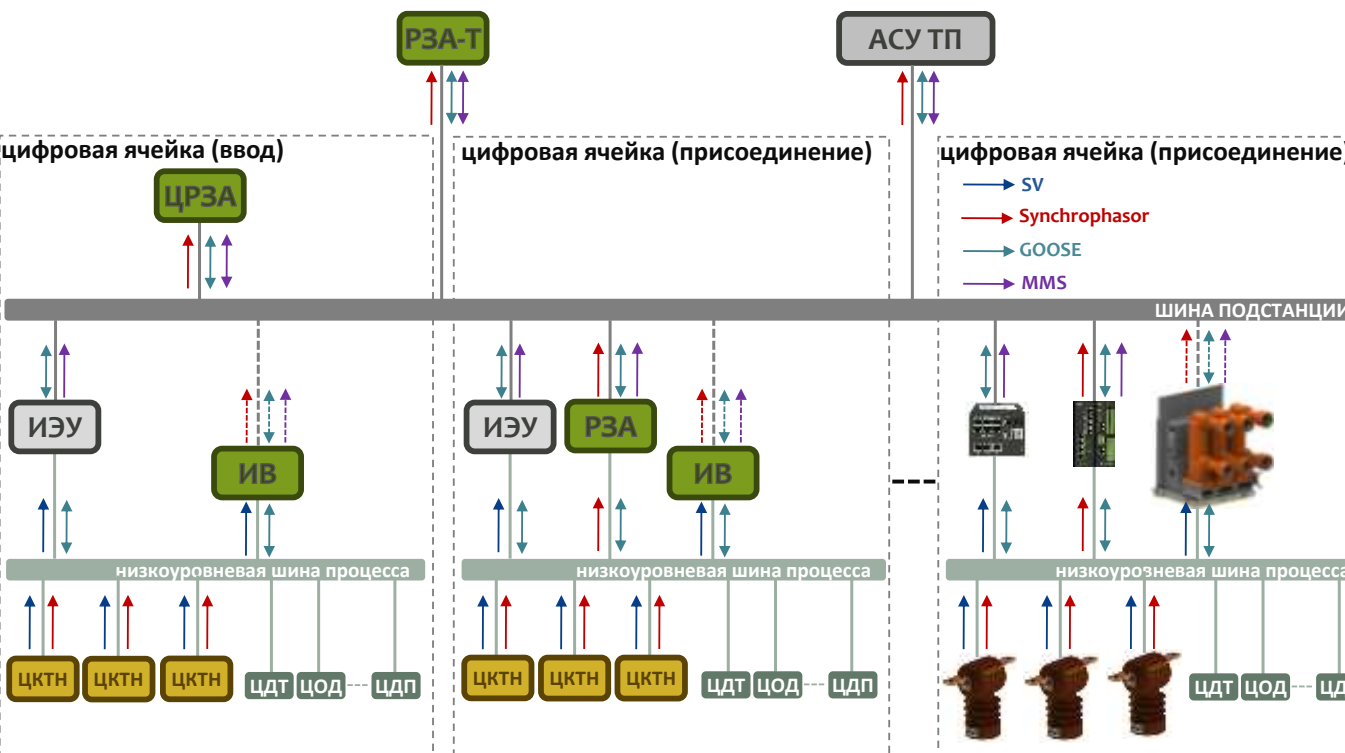
ENMU
NEW



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



ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВИ И ЦПС



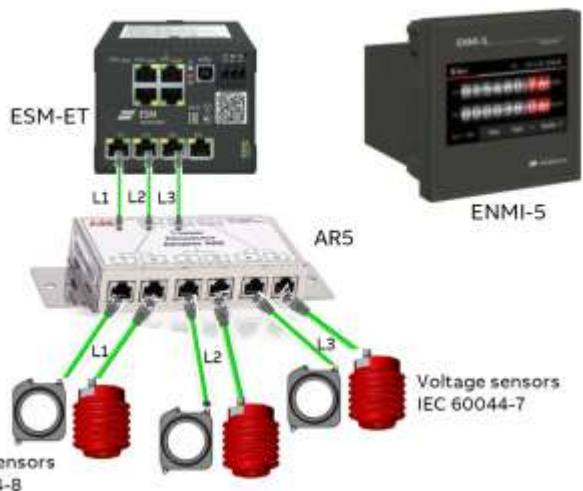
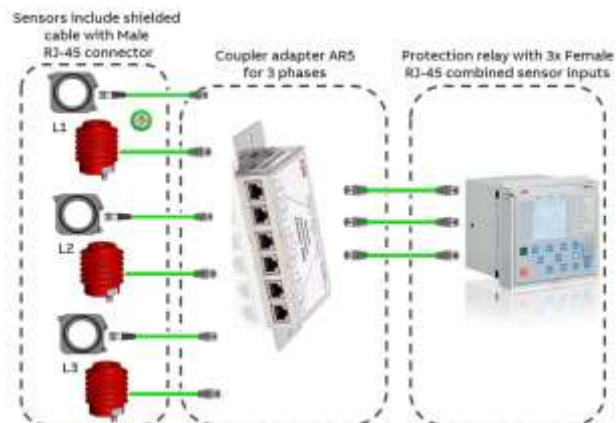
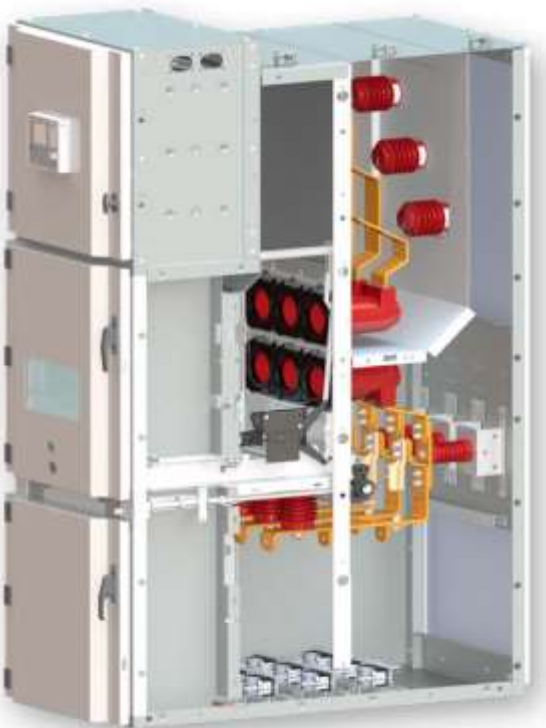
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ



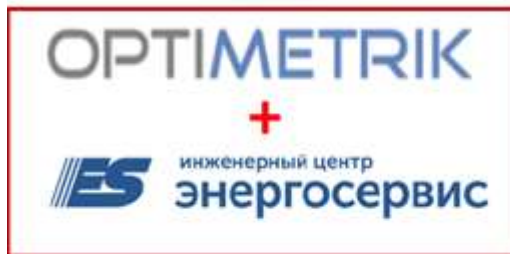
UniGear Digital

Statistical energy multimeter

Manufacturer: EnergoService, R U, <https://enip2.ru/en/>



Current sensors IEC 60044-B



Цифровой
комбинированный
трансформатор тока и
напряжения



Модификации ТЕСV.Р1-10:

- с цифровым выходом передачи измерений.

Измерение тока:

- трансформатор тока маломощный LPCT,
- катушка Роговского.

Измерение напряжения:

- емкостной делитель напряжения.



Цифровой КДТН ТЕСV.Р1-10 со
встроенным преобразователем
аналоговых сигналов (АМУ).

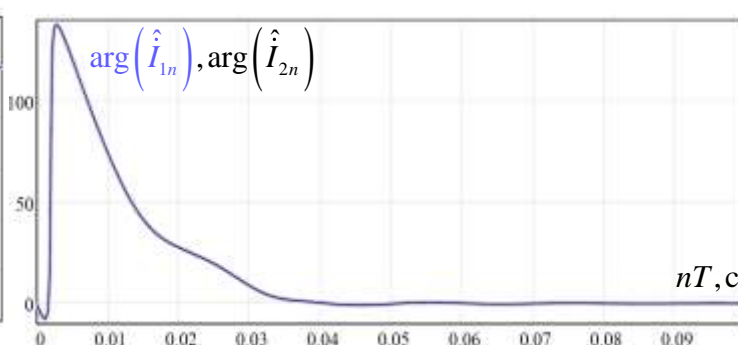
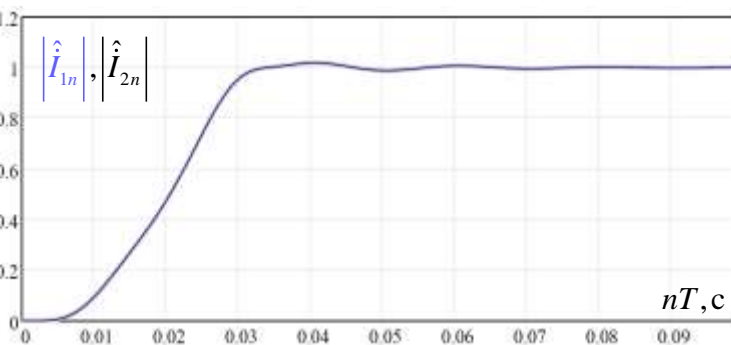
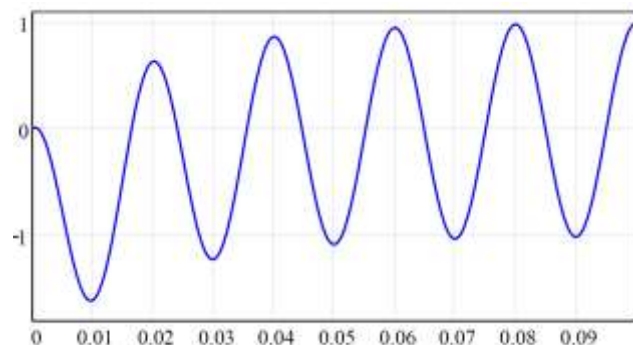
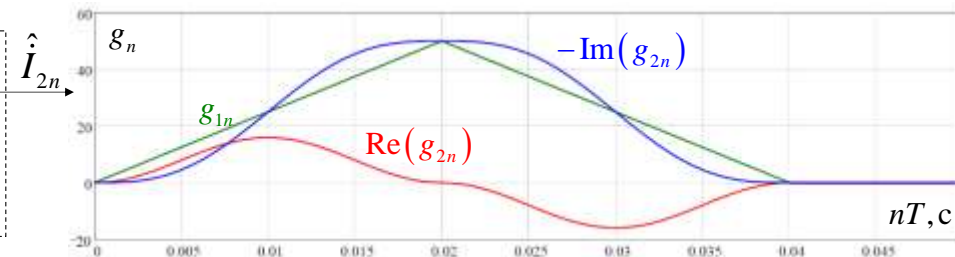
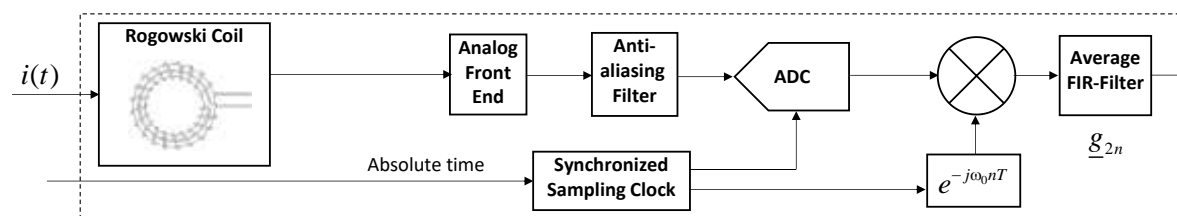
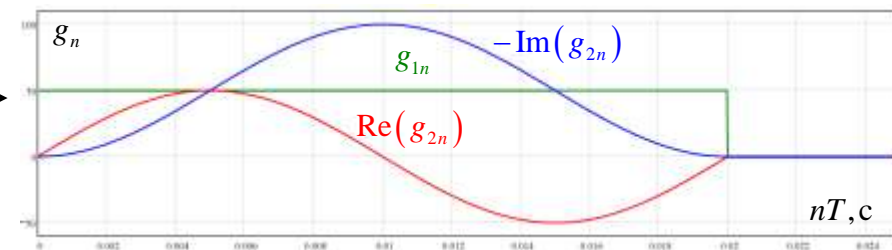
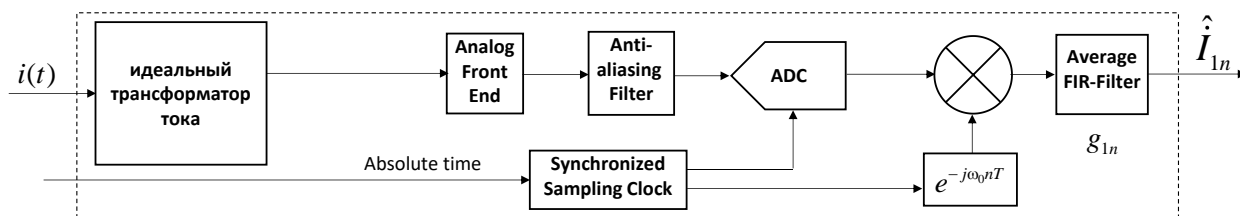
ЦИФРОВОЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ИТТН ЕСІТ



Отличительная особенность первичных измерительных преобразователей тока на основе катушки Роговского связана с пропорциональностью выходного сигнала производной первичного тока.

В ЕСІТ производится дополнительная цифровая обработка сигналов для восстановления первичного тока с последующим формированием SV-потокв и обработка сигналов для формирования синхровекторов тока.

Разработан метод синтеза цифровых фильтров для формирования синхровекторов с учетом особенностей катушки Роговского. При этом вместо усредняющего КИХ-фильтра, необходимо использовать КИХ-фильтр с комплексной импульсной функцией.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ



1. Развитие теории СВИ позволит повысить техническое совершенство систем релейной защиты, автоматики, мониторинга и управления и позволит приступить к реализации распределенных систем WAMPACS.
2. На основе методов анализа исходных синхровекторов напряжения и тока переходных процессов, предложены способы совершенствования устройств релейной защиты, идентификации параметров линий электропередачи, реализация виртуальных УСВИ, систем мониторинга состояния трансформаторов, улучшения динамической оценки состояния энергосистемы.
3. Разработаны алгоритмы быстродействующей дистанционной защиты на основе СВИ. При реализации двухсторонних измерений синхровекторов дистанционная защита будет эффективно отстроена от влияния нелинейного переходного сопротивления дуги, от электромеханических и электромагнитных переходных процессов.
4. Разработан алгоритм направленной защиты от замыканий на землю для распределительных сетей среднего напряжения, основанной на применении эквивалентных синхровекторов тока и напряжения нулевой последовательности высших гармоник. Указанная защита может применяться как локальная, так и в составе распределенных систем защиты от замыканий на землю.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Контакты:

Мокеев Алексей Владимирович,
зам. генерального директора ООО "Инженерный центр "Энергосервис",
профессор Северного (Арктического) федерального университета, д.т.н.
8 (911) 5917591, a.mokeev@ens.ru, a.mokeev@narfu.ru