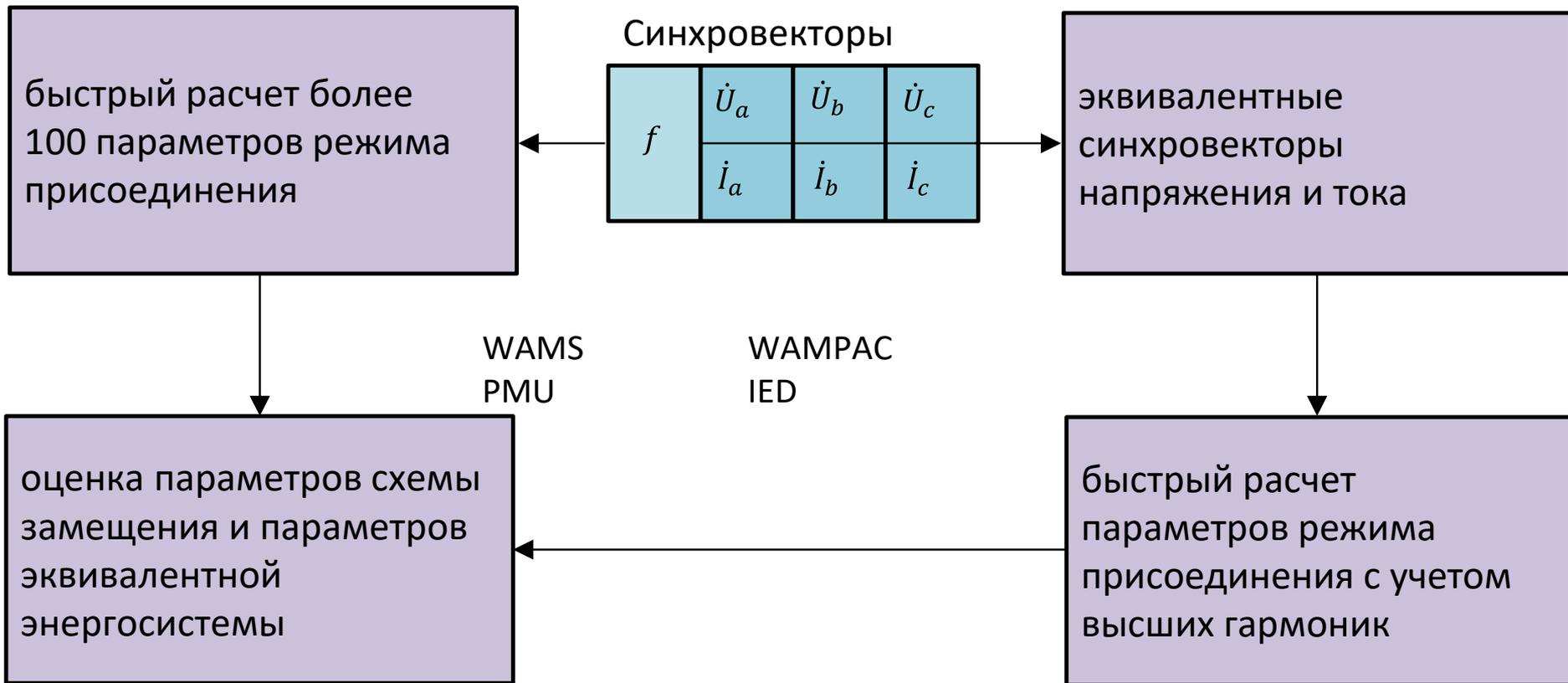


РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

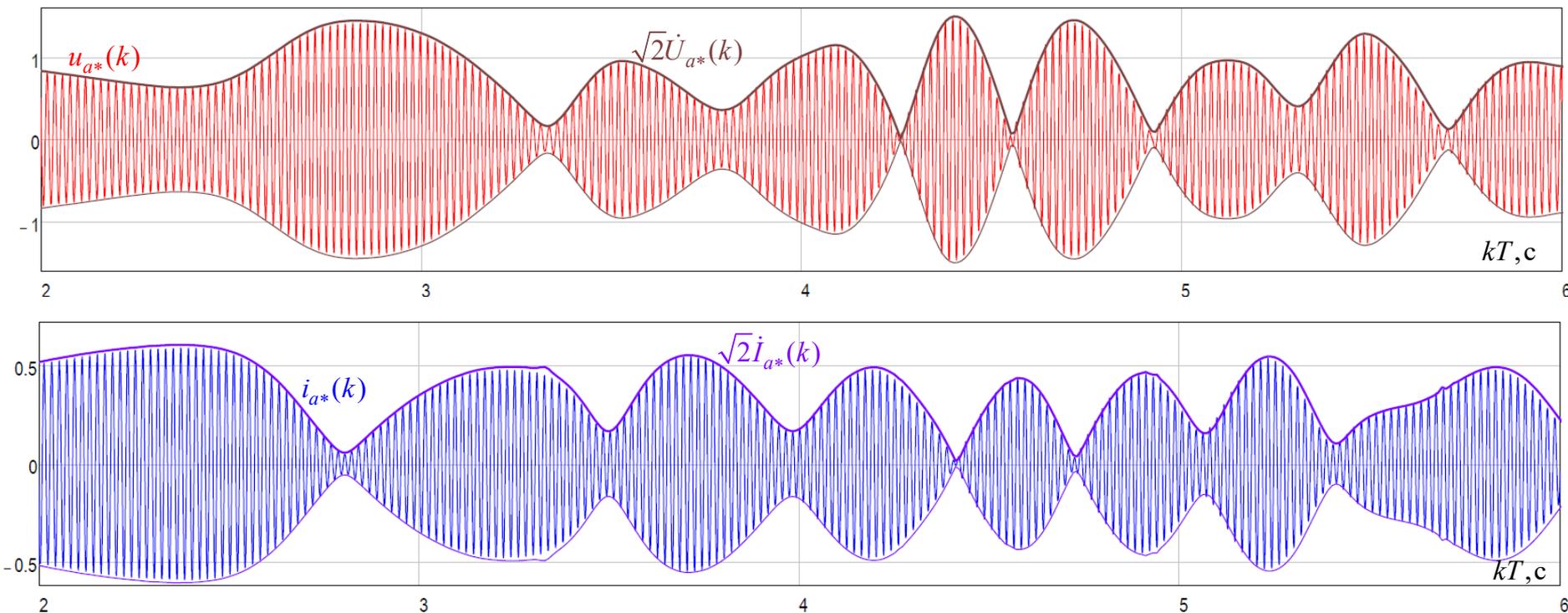
Мокеев А.В.

*ООО «Инженерный центр «Энергосервис»,
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова*

- системы мониторинга переходных режимов (СМПР, WAMS - Wide Area Measurement Systems);
- оценка состояния энергосистем (WACS - Wide Area Control Systems);
- мониторинг НЧК (Low-frequency oscillations);
- мониторинг системных регуляторов;
- идентификация параметров линий, трансформаторов и т.д.;
- локализация повреждений;
- релейная защита и автоматика (в т.ч. WAPS);
- режимная и противоаварийная автоматика;
- системы мониторинга состояния электрооборудования и коммутационной аппаратуры;
- системы управления, мониторинга, релейной защиты и автоматики (WAMPACS).

**Дополнительно:**

- эквивалентные синхровекторы высших гармоник
- синхровекторы фазных полных мощностей для реализации различных алгоритмов измерения полной и реактивной мощности



- 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.

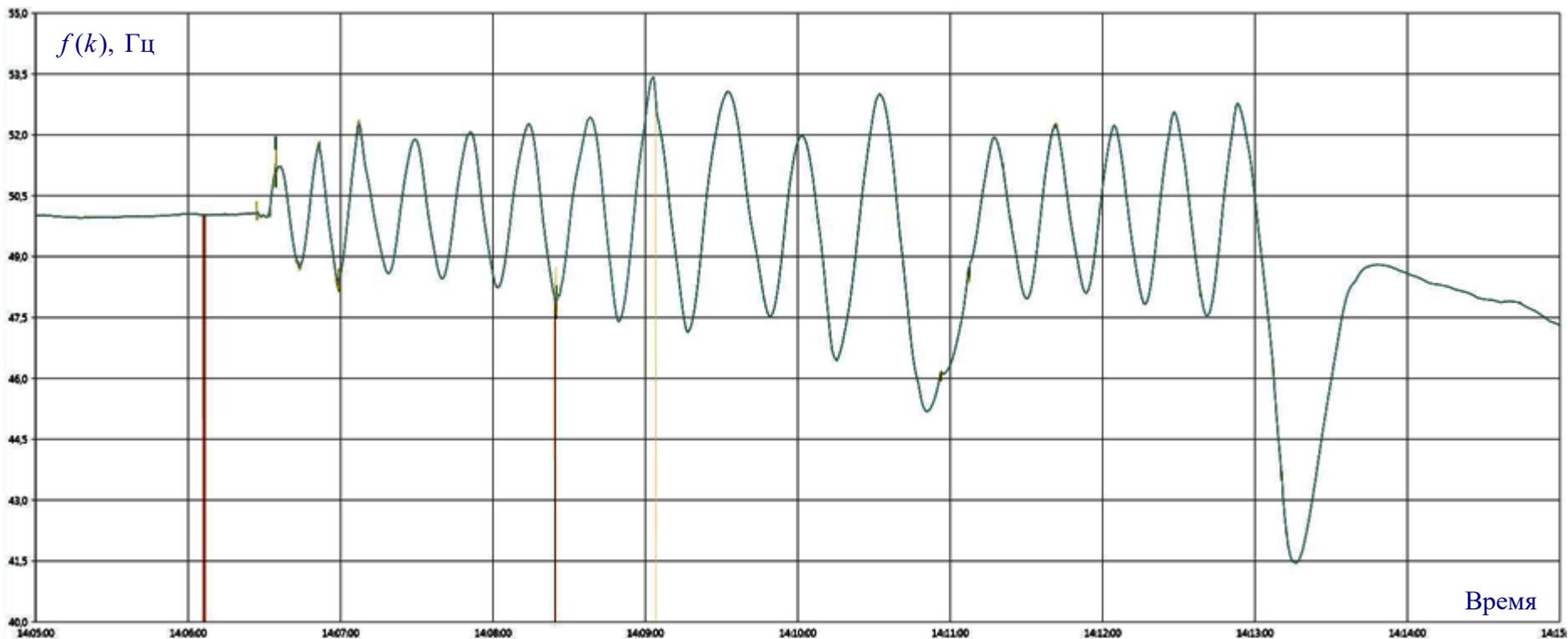
СИНХРОВЕКТОРЫ (СИНХРОФАЗОРЫ)

Синхровектор напряжения

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

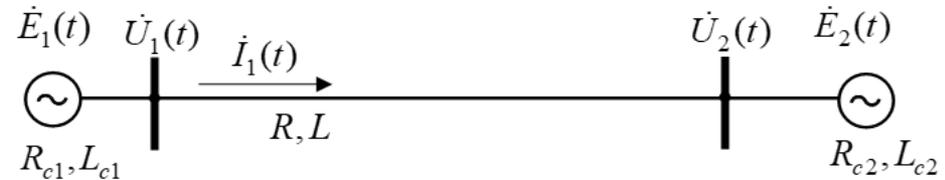
Мгновенная частота

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



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

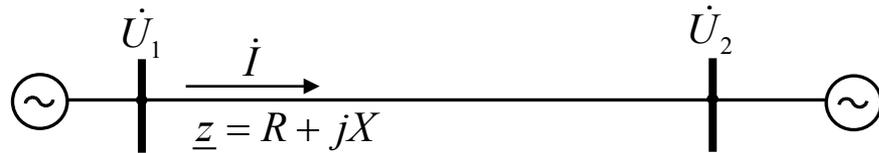
Задан синхровекторы ЭДС $\dot{E}_1(t)$ и $\dot{E}_2(t)$.
 Определить синхровектор $\dot{I}_1(t)$



№	Метод	Выражения
1	Декомпозиция ЭДС	$\Delta e(t) = e_1(t) - e_2(t), \Delta e(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{E}}^T e^{pt}), \dot{\mathbf{E}} = [\dot{E}_n]_N = [E_{m_n} e^{-j\varphi_n}]_N, \mathbf{p} = [-\beta_n + j\omega_n]_N$ $\dot{\mathbf{I}}_1(t) = \dot{\mathbf{E}} \circ Y(\mathbf{p}, t), \dot{\mathbf{I}}_{1s} = \dot{\mathbf{E}} \circ Y_0(\mathbf{p}), \dot{\mathbf{I}}_{1f}(t) = \dot{\mathbf{E}} \circ Y_1(\mathbf{p}, t),$ $Y(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau, Y(p, t) = Y_0(p) + Y_1(p, t), g(t) \Leftrightarrow Y_0(p) = \frac{1}{R_\Sigma + pL_\Sigma}$
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	$\dot{I}_1(t) \approx \Delta \dot{E}(t) Y(j\omega(t), t), \dot{I}_{1s}(t) \approx \Delta \dot{E}(t) Y(j\omega(t)), \dot{I}_{1f}(t) \approx \Delta \dot{E}(0) Y_1(j\omega(t), t)$ <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	$\dot{I}_1(t) = \frac{1}{L_\Sigma} \int_0^t \Delta \dot{E}(t - \tau) e^{-p_1\tau} d\tau$

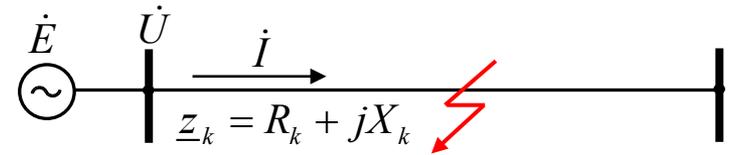
○ — операция умножения векторов

Идентификация параметров линии



$$u_1(t) - u_2(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt}$$

Дистанционная защита



$$u(t) = i(t)R_k + L_k \frac{di(t)}{dt}$$

Символический метод (метод комплексных амплитуд)

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

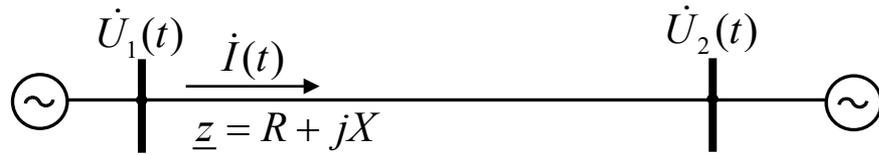
$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \underline{z}\dot{I}$$

$$\underline{z} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{I}}$$

$$\dot{U} = \underline{z}_k \dot{I}$$

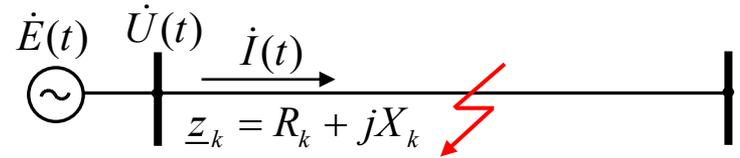
$$\underline{z}_k = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

Идентификация параметров линии



$$u_1(t) - u_2(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt}$$

Дистанционная защита



$$u(t) = i(t)R_k + L_k \frac{di(t)}{dt}$$

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

$$\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) = \dot{I}(t)R + j\omega_0 \dot{I}(t)L + L \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$$

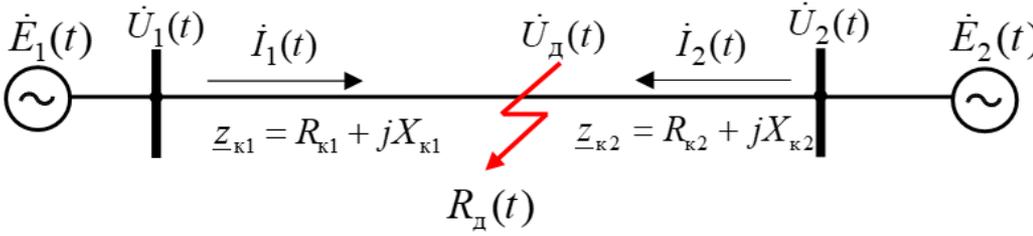
$$\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) = \underline{z} \cdot \dot{I}(t) + L \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$$

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

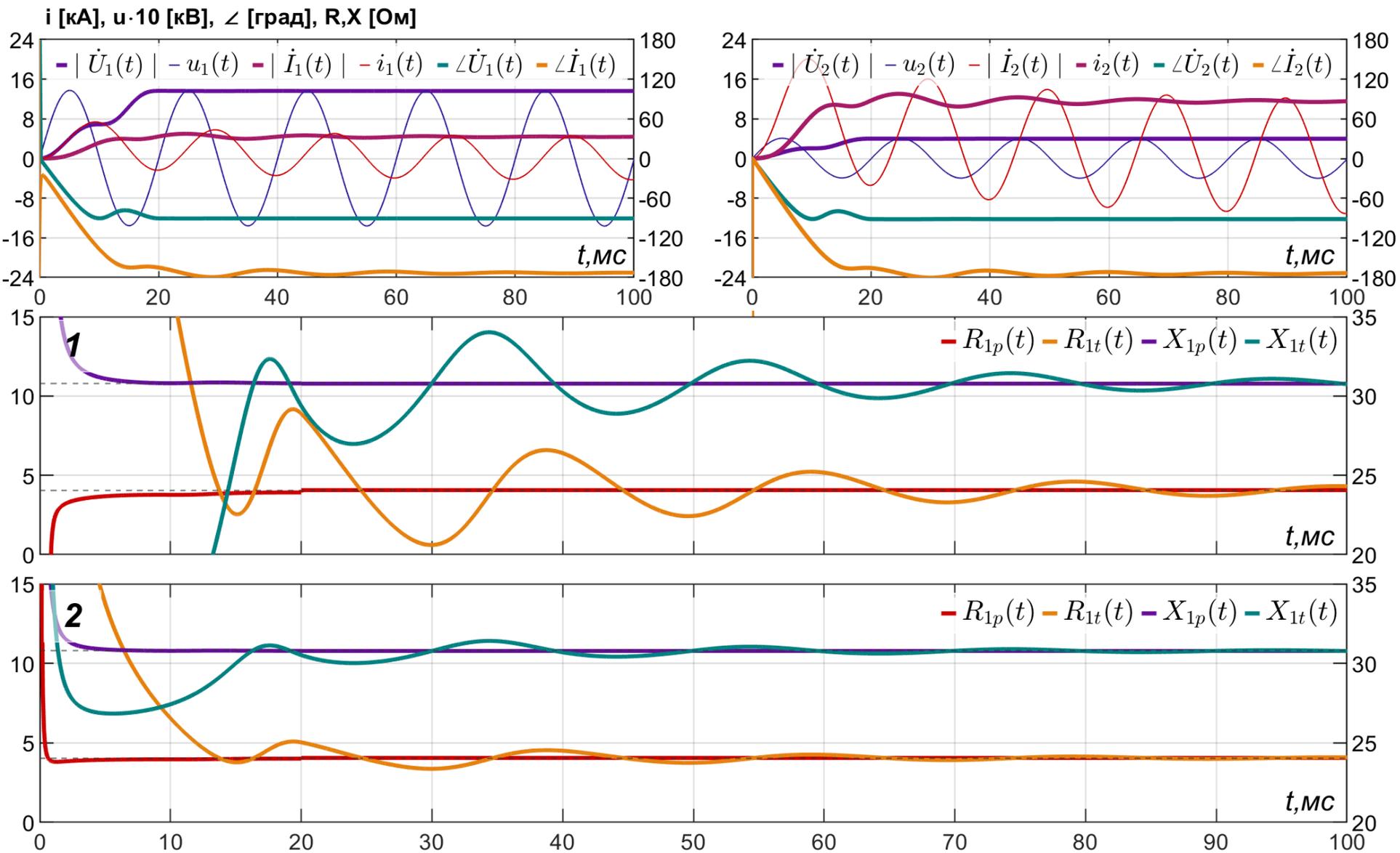
$$\underline{\hat{z}}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k} \cdot \dot{I}'(t)}$$

$$\underline{k} = \frac{L_{\text{уд}}}{z_{\text{уд}}}, \quad \dot{I}'(t) = \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$$

$$\underline{\hat{z}}_k(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k} \cdot \dot{I}'(t)}$$

№	Наименование	Выражение
1	Модель энергосистемы	
2	Оценка комплексного сопротивления при двухстороннем измерении синхровекторов	$\hat{z}_{k1}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + \underline{z} \dot{I}_2(t) + L \dot{I}'_2(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k} \dot{I}'(t)},$ <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	$\hat{l}_{k1}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + \underline{z} \dot{I}_2(t) + L \dot{I}'_2(t)}{\underline{z}_{yd} \dot{I}(t) + L_{yd} \dot{I}'(t)}$
3	Оценка комплексного сопротивления линии в нормальном режиме и при внешних КЗ	$\hat{z}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k}_1 \dot{I}'(t)},$ <p>где $\dot{I}(t) = \dot{I}_1(t)$ или $\dot{I}(t) = \frac{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)}{2}$</p>

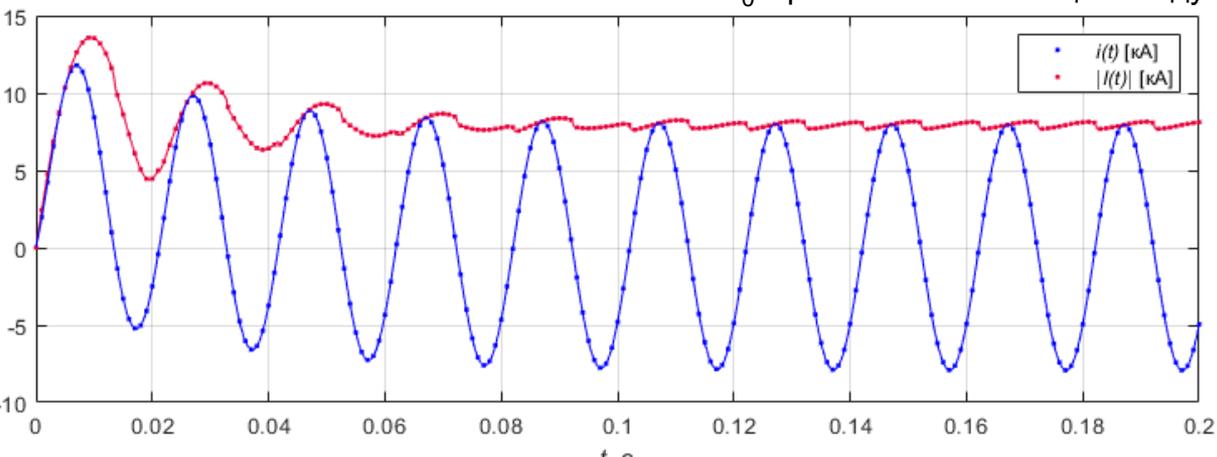
Оценка R, X при одностороннем (1) и при двухстороннем (2) замере



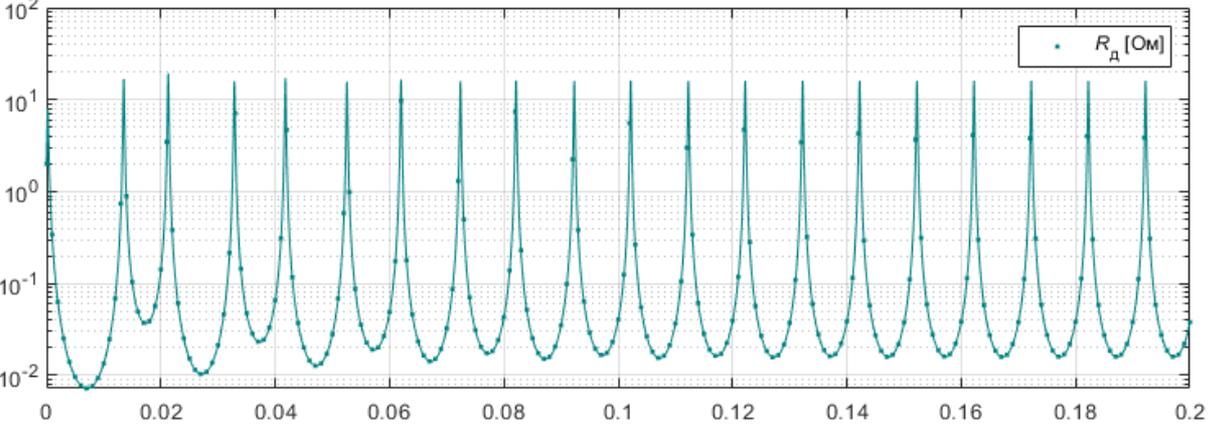
ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ДУГИ

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dR_d(t)}{dt} &= -\frac{R_d(t)}{\tau} \left(\frac{[\operatorname{Re}(i(t)e^{j\omega_0 t})]^2 R_d(t)}{P_0} - 1 \right) \\ \frac{di(t)}{dt} &= \frac{1}{L_\Sigma} (\dot{E}(t) - (z_\Sigma + R_d(t))i(t)) \end{aligned} \right.$$

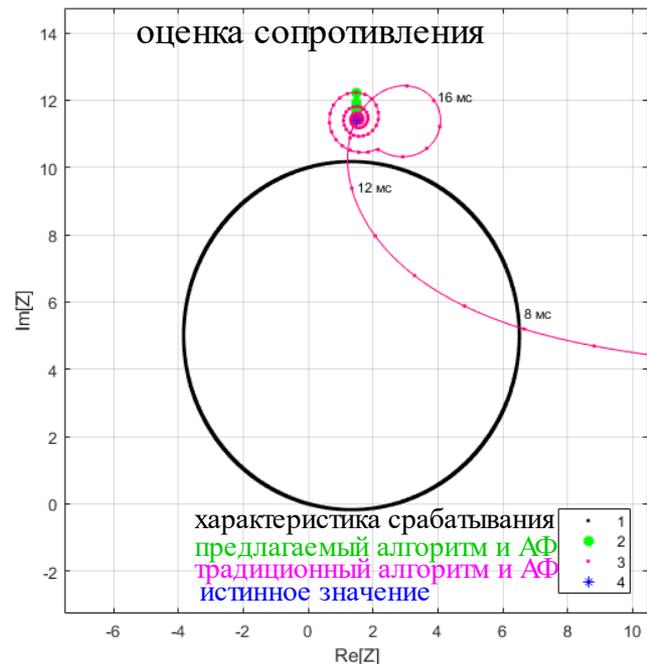
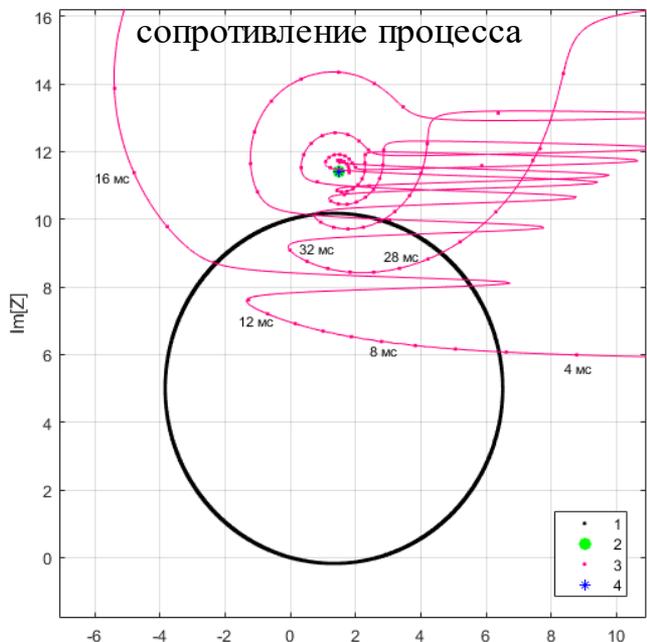
$z_\Sigma = R_\Sigma + j\omega_0 L_\Sigma$, $R_\Sigma = R + R_c$
 τ – постоянная времени дуги,
 P_0 – рассеиваемая мощность дуги



Мгновенные значения тока и модуль полного синхровектора тока

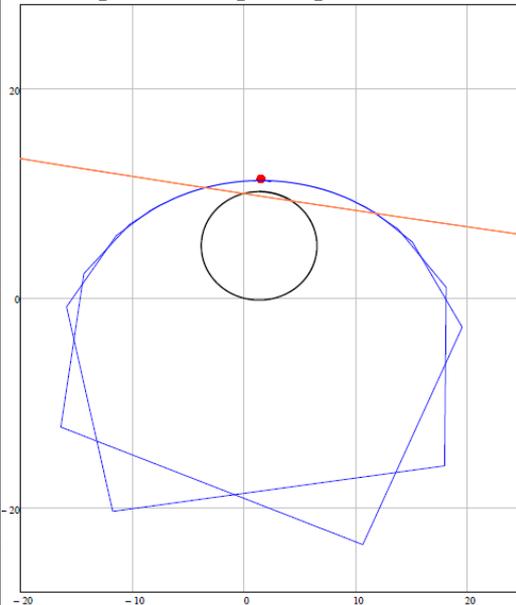


Переходное сопротивление дуги t, c

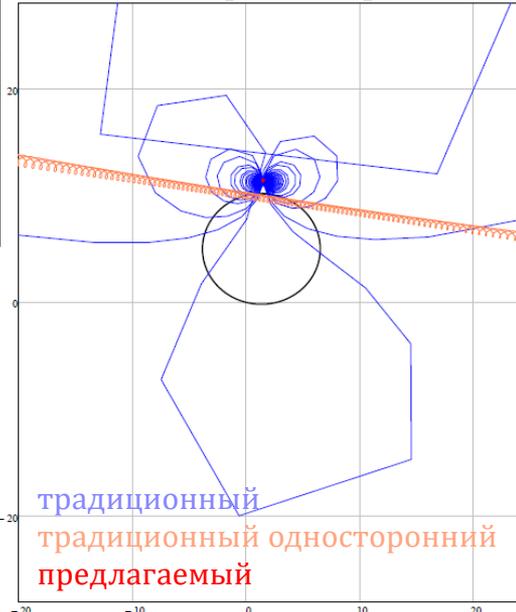


РАБОТА ДЗ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

синхровекторы процессов



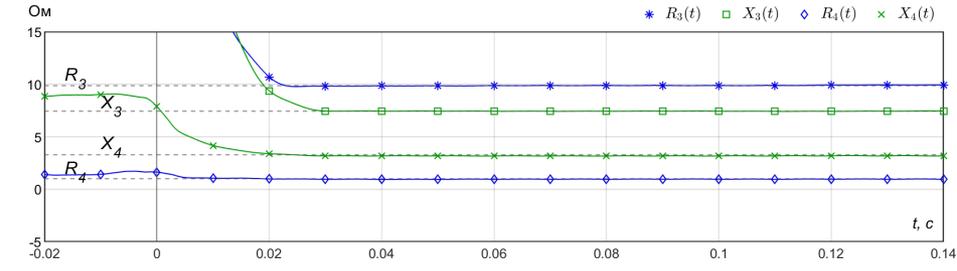
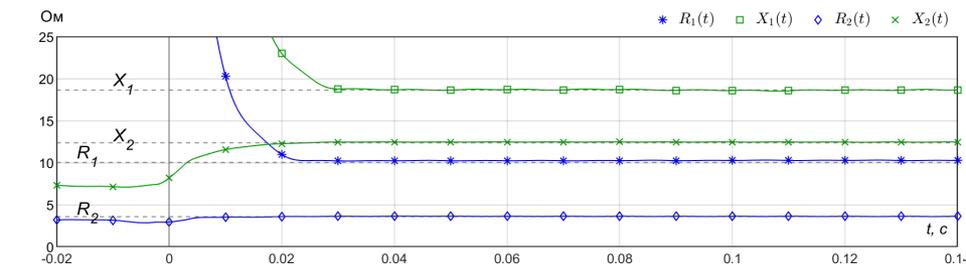
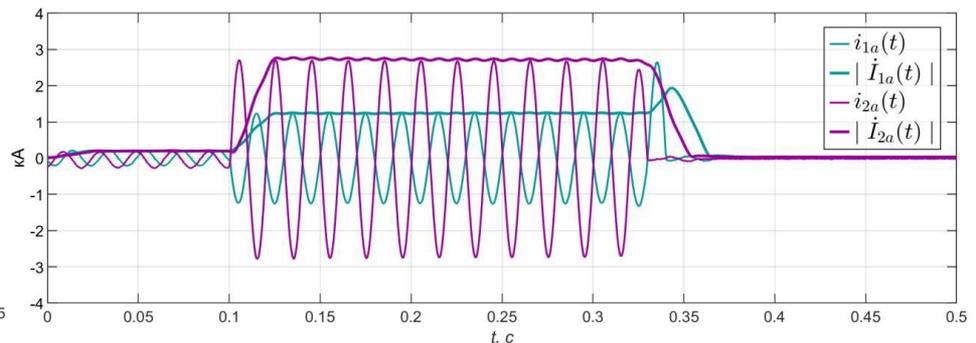
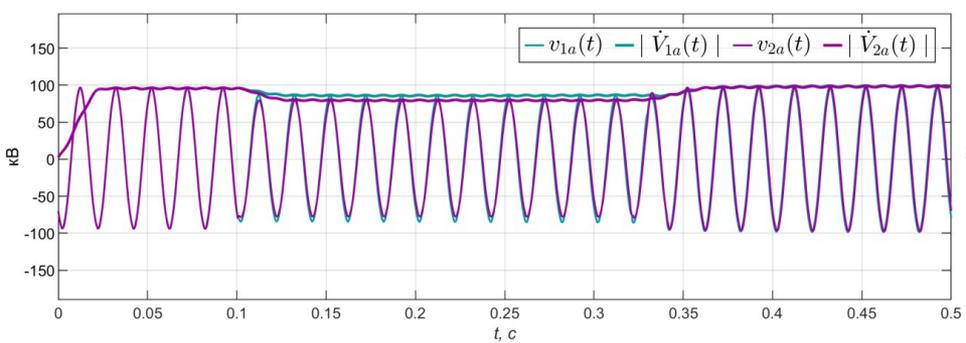
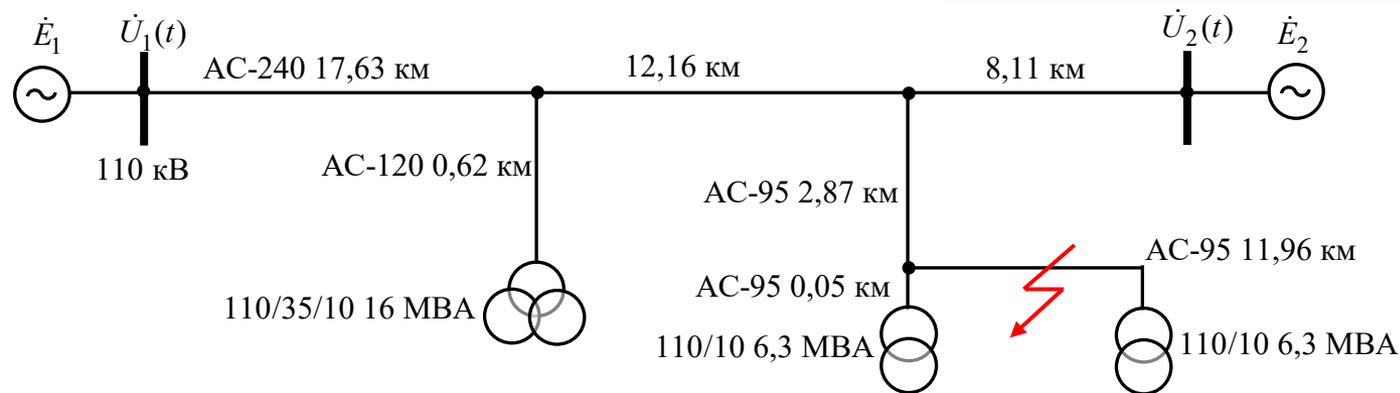
оценка синхровекторов



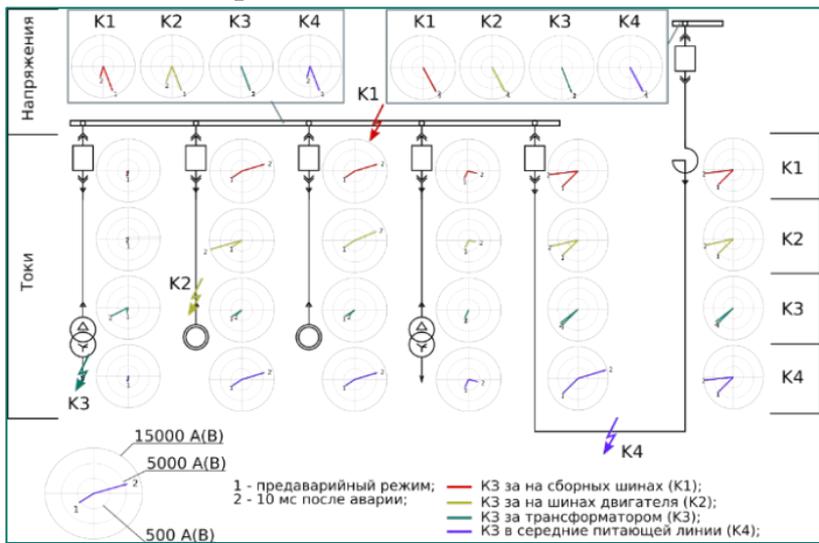
№	Наименование	Выражение
1	Энергосистема	<p>236 кВ $\omega_1 = 2\pi 45$ рад/с $Z_{s1} = 1,2 + j12,8$ Ом</p> <p>231 кВ $\omega_0 = 2\pi 50$ рад/с $Z_{s0} = 0$</p>
2	ДУ	$\Delta e(t) = R_{03}i(t) + L_{03} \frac{di(t)}{dt}$
3	Синхровекторы	$\dot{E}_1(t) = \dot{E} e^{j\Delta\omega t}$, $\Delta \dot{E}(t)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

1	Традиционный алгоритм ДЗ, двухсторонний замер	$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t)} = z_{12} \frac{(\omega_0 + \Delta\omega)(\dot{E} e^{j\Delta\omega t} - \dot{E}_0)}{\omega_0 \dot{E} e^{j\Delta\omega t} - (\omega_0 + \Delta\omega) \dot{E}_0}$
2	Традиционный алгоритм ДЗ, односторонний замер	$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t)}{\dot{I}(t)} = \frac{\left(1 - \frac{z_{01}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{01}}{z_{\Delta 03}}\right) \dot{E}_1 e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{01}}{z_{03}} \dot{E}_0}{\frac{\dot{E}}{z_{\Delta 03}} e^{j\Delta\omega t} - \frac{\dot{E}_0}{z_{03}}}$
3	Предлагаемый алгоритм	$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + k \dot{I}'(t)} = z_{12}$

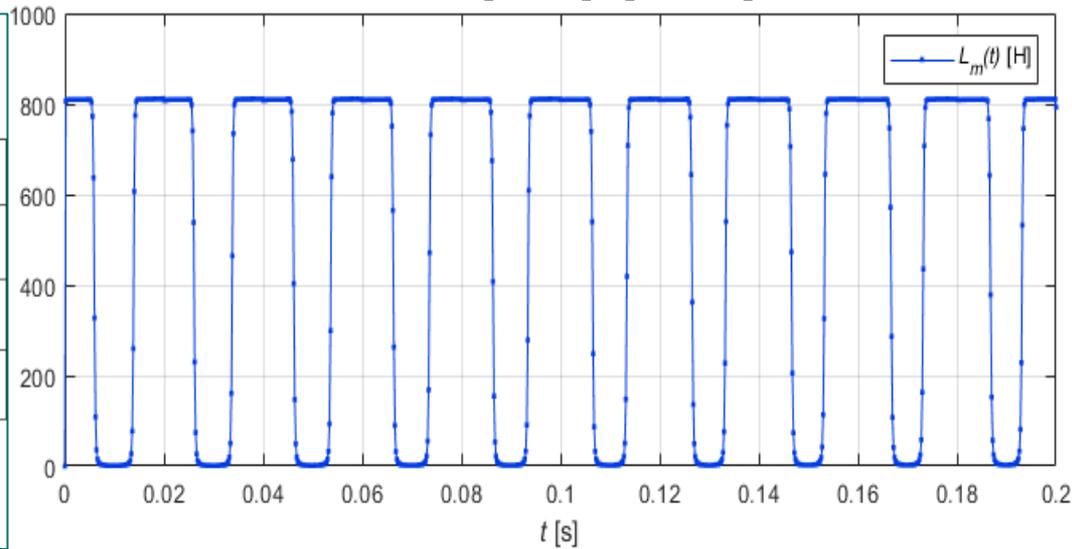
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЗ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАС



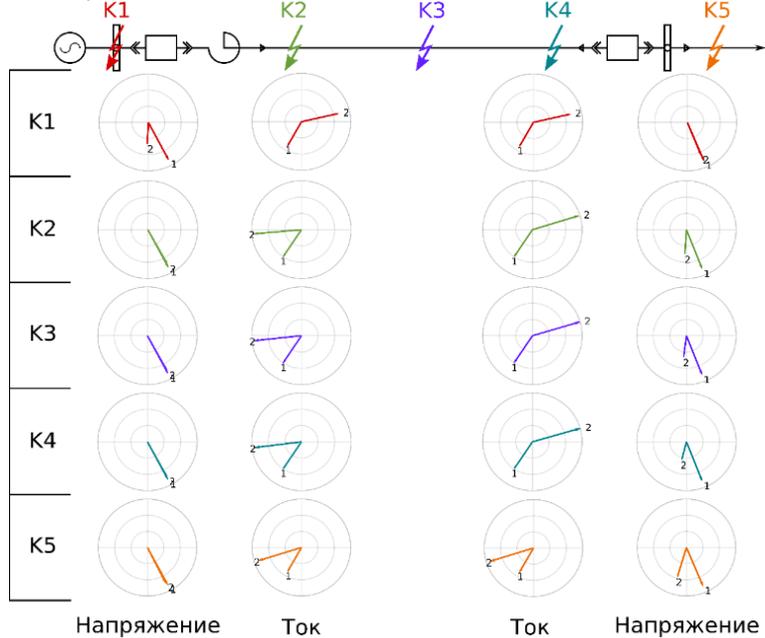
Защита сборных шин



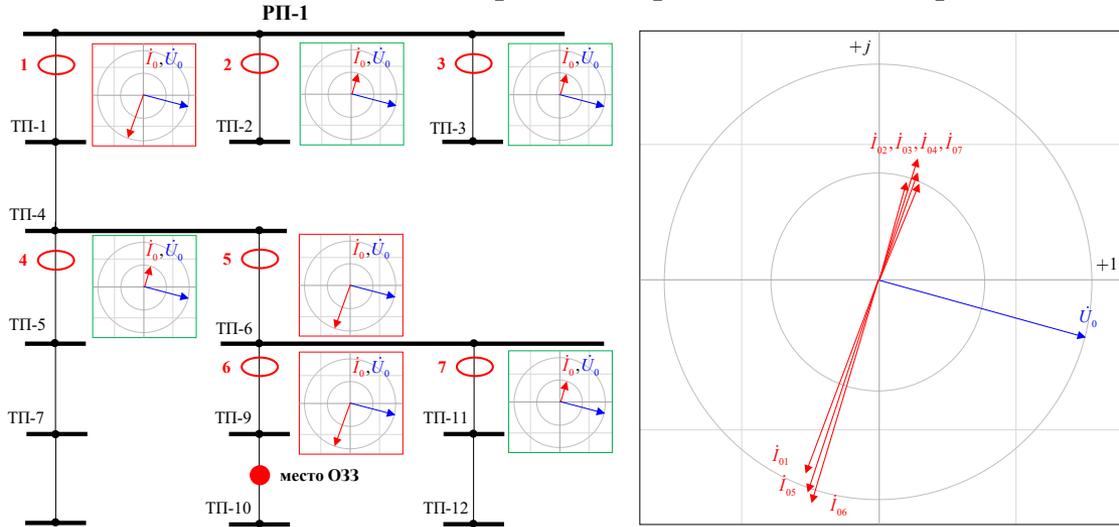
Защита силового трансформаторов



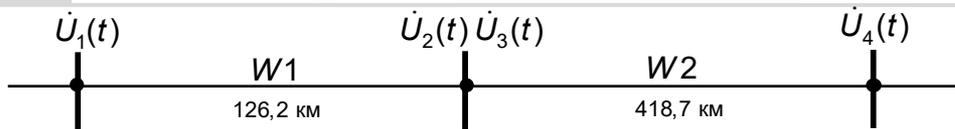
Защита кабельной линии



Направленная защита НП при использовании эквивалентных синхровекторов высших гармоник



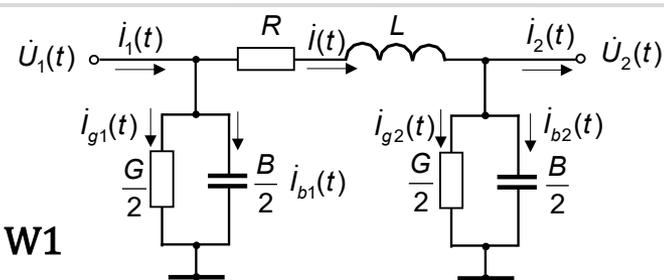
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ, ВИРТУАЛЬНЫЙ УСВИ



ПС Кубанская

ПС Тамань

ПС Ростовская



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

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

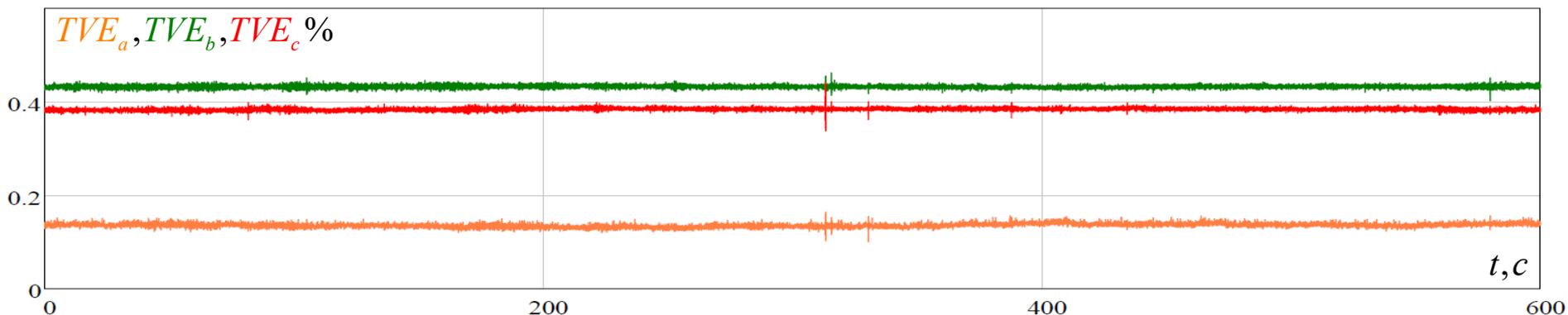
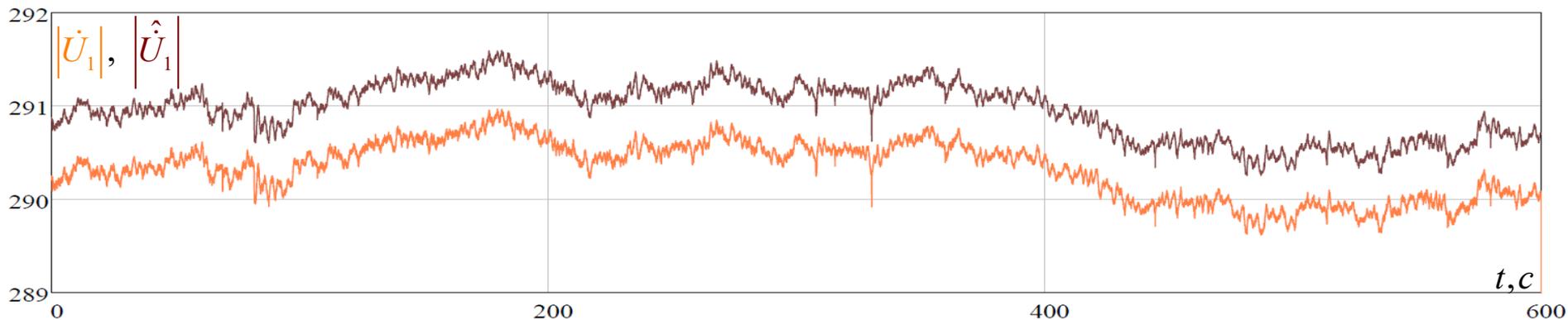
$$\dot{I}(t) = \dot{I}_2(t) + \frac{G}{2}\dot{U}_2(t) + j\frac{B}{2}\dot{U}_2(t) + \frac{B}{2\omega_0} \frac{d\dot{U}_2(t)}{dt}$$

$$\dot{U}_1(t) = \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{I}(t) + L\frac{d\dot{I}(t)}{dt}, \text{ где } \underline{z} = R + j\omega_0 L$$

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

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

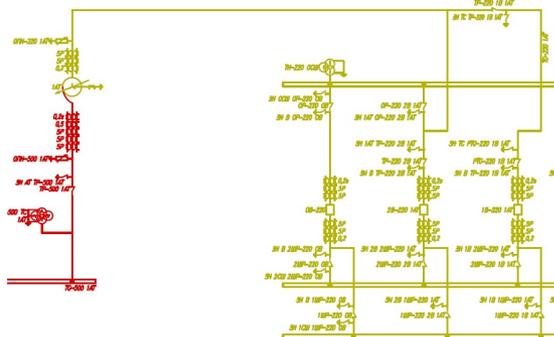
$$\dot{U}_1(n) = \dot{U}_2(n) + \underline{z}\dot{I}(n) + L\nabla \dot{I}(n)$$



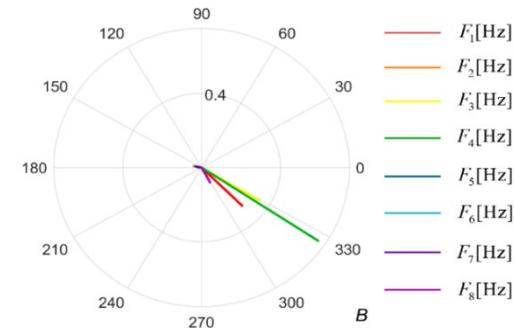
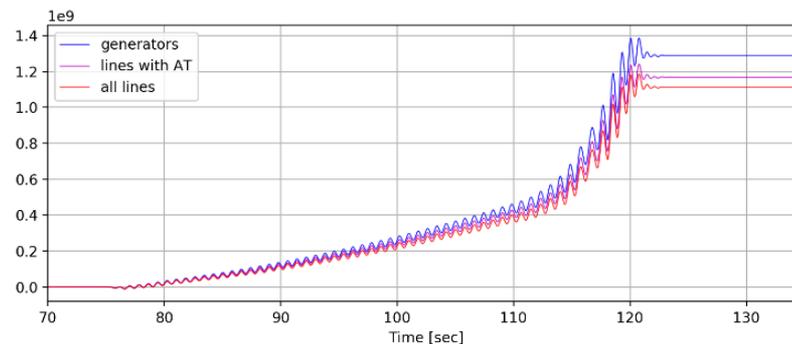
ПОИСК ИСТОЧНИКА НЧК, ВИРТУАЛЬНЫЙ УСВИ

№	Метод	Выражения
2	Частотно-временной подход	$\dot{I}_1(t) = \Delta\dot{U}(t)Y_0(j\omega_0) + \int_0^t Y_1(j\omega_0, \tau) d\Delta\dot{U}(t-\tau) + \Delta\dot{U}(0)Y_1(j\omega_0, t)$
3	Упрощенный частотно-временной подход	$\dot{I}_1(t) \approx \Delta\dot{U}(t)Y(j\omega(t), t), \dot{I}_{1s}(t) \approx \Delta\dot{U}(t)Y(j\omega(t)), \dot{I}_{1f}(t) \approx \Delta\dot{U}(0)Y_1(j\omega(t), t)$ где $\omega(t)$ - мгновенная частота, рассчитываемая на основе $\Delta\dot{E}(t)$
4	Решение дифференциального уравнения	$\dot{I}_1(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \Delta\dot{U}(\tau) e^{p_1(t-\tau)} d\tau, \quad p_1 = \beta_1 + j\omega_0, \quad \beta_1 = \frac{R}{L}, \quad \omega_0 = 2\pi 50 \text{ рад/с}$

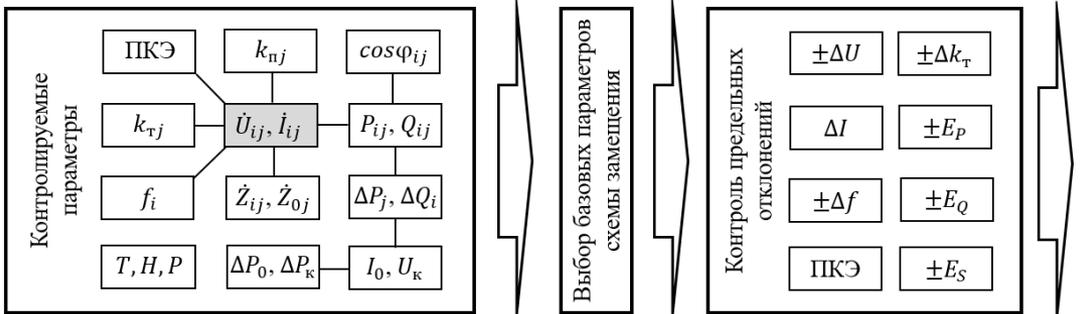
№	Метод	Выражения
2	Частотно-временной подход	$\dot{I}_1(n) = \Delta\dot{U}(n)Y_0(j\omega_0) + T \sum_{m=0}^n Y_1(j\omega_0, m) \Delta\dot{U}'(n-m) + \Delta\dot{U}(0)Y_1(j\omega_0, n)$
3	Упрощенный частотно-временной подход	$\dot{I}_1(n) \approx \Delta\dot{U}(n)Y(j\omega(n), n), \dot{I}_{1s}(n) \approx \Delta\dot{U}(n)Y(j\omega(n)), \dot{I}_{1f}(n) \approx \Delta\dot{U}(0)Y_1(j\omega(n), n)$ где $\omega(n)$ - мгновенная частота, рассчитываемая на основе $\Delta\dot{E}(n)$
4	Решение дифференциального уравнения	$\dot{I}_1(n) = \frac{T}{L} \sum_{m=0}^n \Delta\dot{U}(m) e^{p_1(n-m)}, \quad p_1 = \beta_1 + j\omega_0, \quad \beta_1 = \frac{R}{L}, \quad \omega_0 = 2\pi 50 \text{ рад/с}$



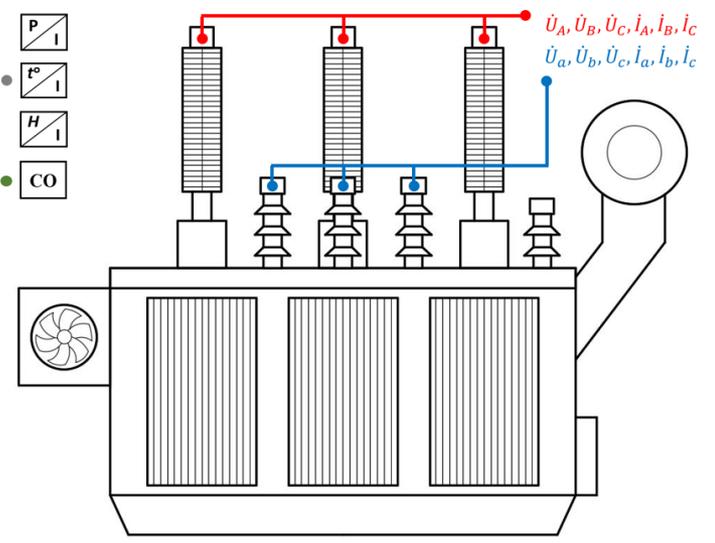
The Dissipating Energy Flow (DEF) method Mode shape estimation (MSE)



СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТРАНСФОРМАТОРОВ

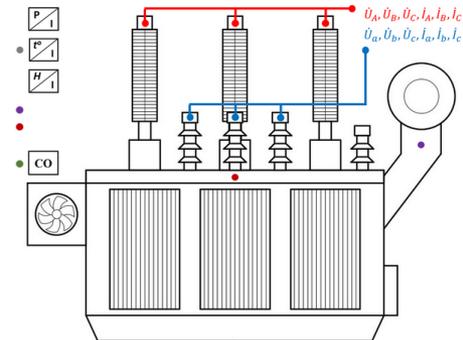


- Функции СМСТ на базе СВИ**
- оценка параметров схемы замещения
 - контроль перегрузочной способности
 - контроль сквозных токов КЗ, БТН
 - оценка степени износа витковой изоляции
 - контроль работы РПН, системы охлаждения
 - контроль параметров окружающей среды
 - энергомониторинг (учет электроэнергии)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



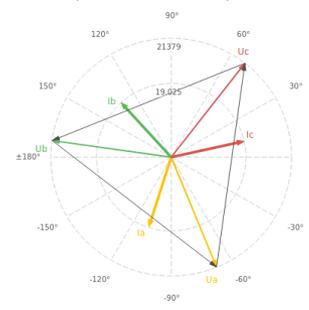
*с учетом номинальной мощности установленных силовых трансформаторов

Мониторинг трансформатора

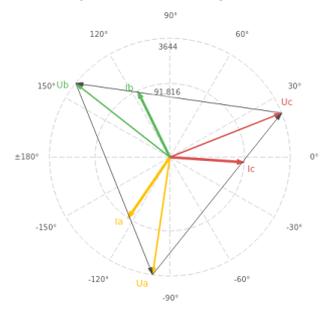


	Напряжение, В	Ток, А
• A	21335 $\angle -67.820^\circ$	19 $\angle -107.565^\circ$
• B	21339 $\angle 171.939^\circ$	19 $\angle 132.194^\circ$
• C	21379 $\angle 52.244^\circ$	19 $\angle 12.498^\circ$
• A	3638 $\angle -98.233^\circ$	92 $\angle -124.075^\circ$
• B	3638 $\angle 141.526^\circ$	91 $\angle 115.684^\circ$
• C	3644 $\angle 21.830^\circ$	92 $\angle -4.012^\circ$
	Расчётное	Теоретическое
Kt	5.833	5.806
Z12	3.8 + j13.6	1.2 + j10.9
Z0	358.5 + j4110.2	370 + j4100
Uка	2115.095	1823
Ixx	5.388	4.949
ΔS	113580.072	114354.791

Страна высокого напряжения



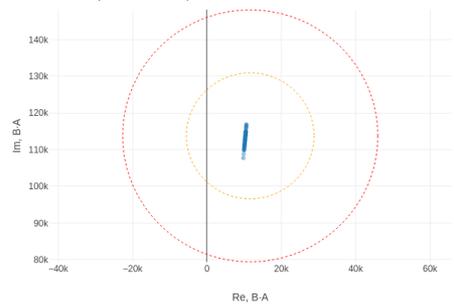
Страна низкого напряжения



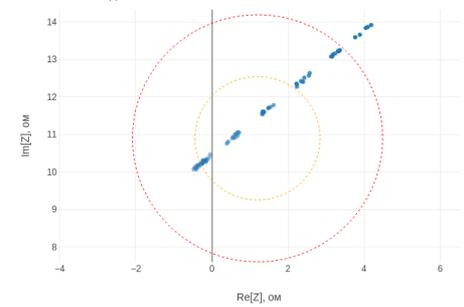
Потери полной мощности |ΔS|



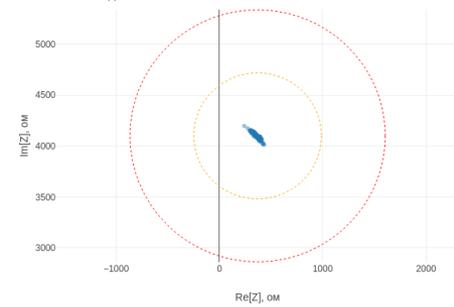
Потери полной мощности ΔS



Импеданс Z12



Импеданс Z0



Коэффициент трансформации



Коэффициент загрузки



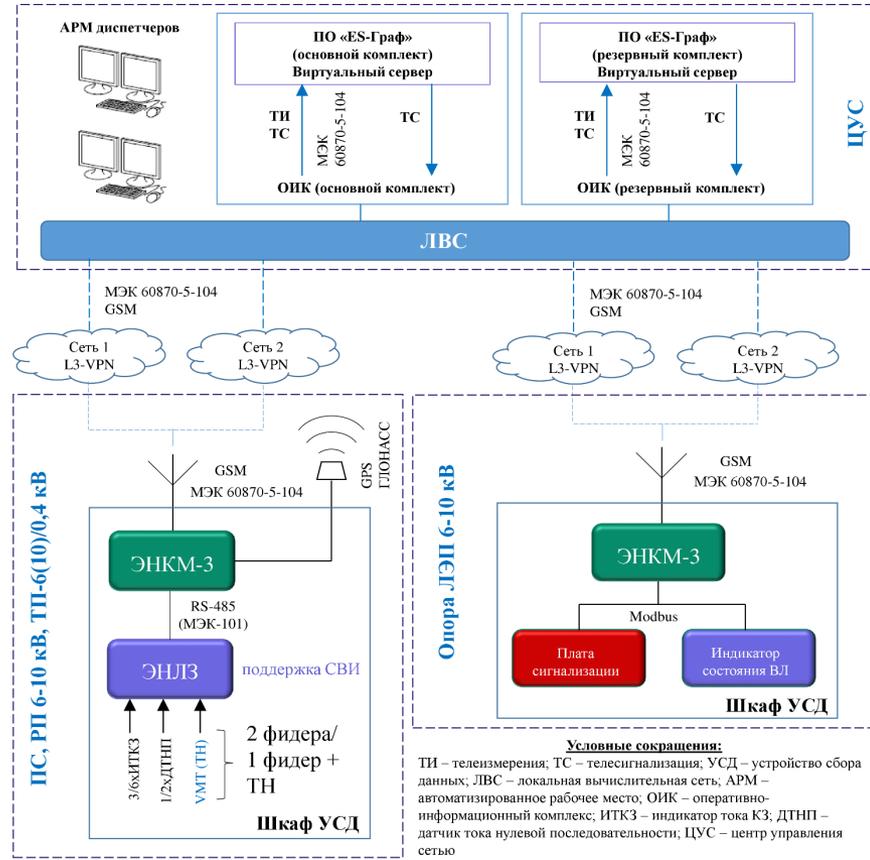
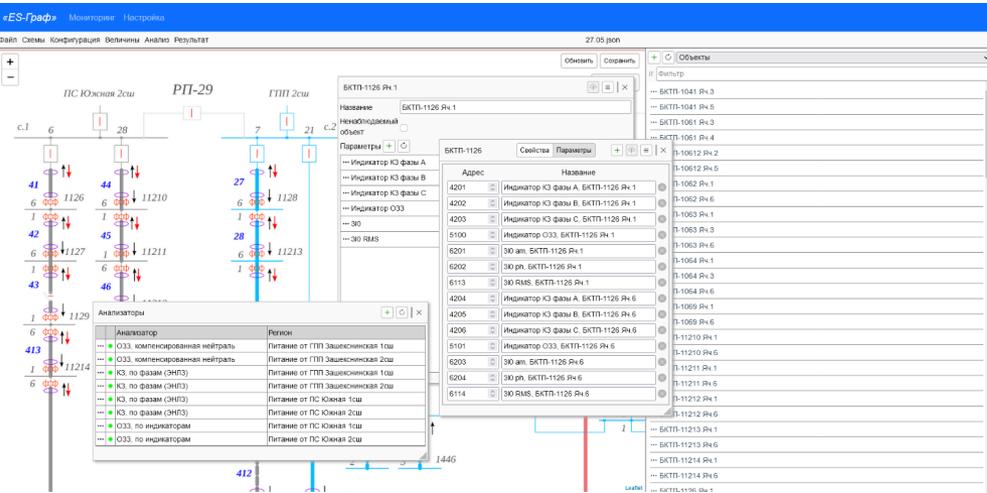
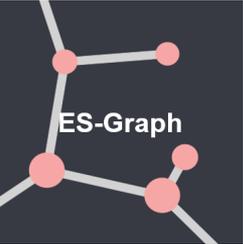
Напряжение КЗ



Ток ХХ



ЗАЩИТА ОТ ОЗЗ

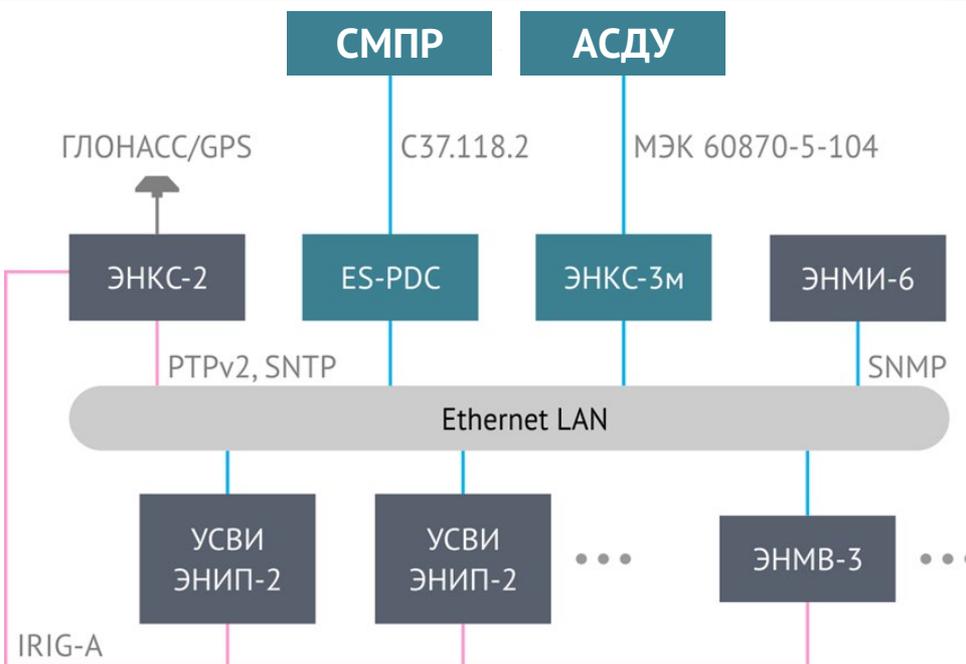


Варианты реализации локализации ОЗЗ:

- по синхровекторам тока и напряжения НП основной частоты в установившемся режиме ОЗЗ,
- по синхровекторам высших гармоник тока НП,
- по синхровекторам тока НП основной частоты в переходном процессе ОЗЗ

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

УСТРОЙСТВА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СМПР



ES-PDC
КСВД



ES-Phasor
обработка
данных



ЭНИП-2
УСВИ/РМУ

ЭНМВ-3
параметры системы интеграция с ССПИ
возбуждения генераторов

ЭНК-3м

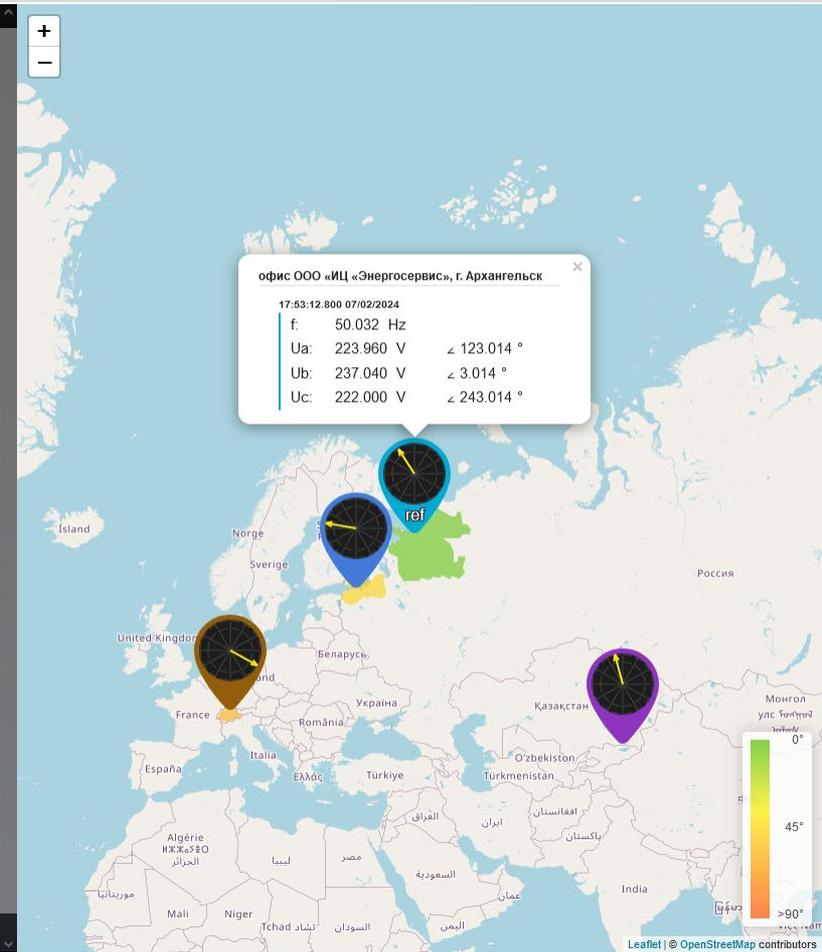
ЭНМИ-6
диагностика

ЭНК-2
синхронизация
времени

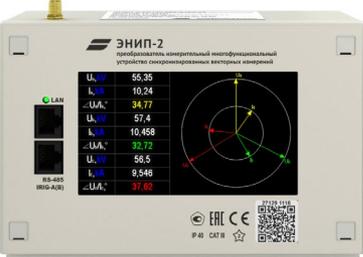
PMU Live! (α₂) О проекте Настройки Архив данных

Список устройств (скрыть/развернуть)

ref	Расположение ЭНИП-2 PMU	Статус
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="radio"/> г. Архангельск, офис ООО «ИЦ «Энергосервис»	✔
<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/> г. Москва, офис ООО «ИЦ «Энергосервис»	✘
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="radio"/> г. Санкт-Петербург, офис «НПФ «Энергосоюз»	✔
<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/> г. Рига, Физико-Энергетический Институт	✘
<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/> г. Омск, ООО «ЭнСервиКо»	✘
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="radio"/> г. Цюрих, Швейцария	✔
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="radio"/> г. Алматы, Казахстан	✔



ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА



ЭНИП-2-УСВИ



ЭНМВ-3

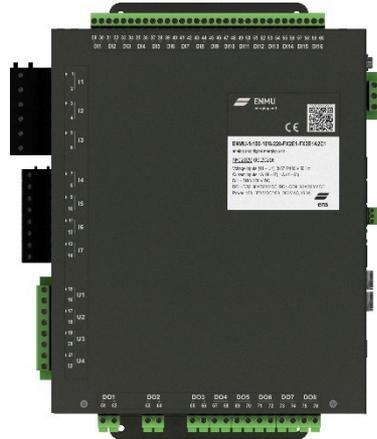


ESM



ЭНИП-2

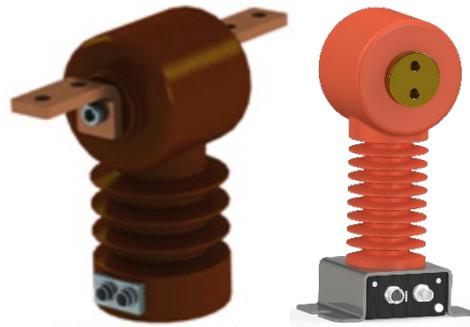
ПАС



ENMU



ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ



TECV.P1-10

ECIT-10

КСВД



ES-PDC

Синхронизация



Диагностика



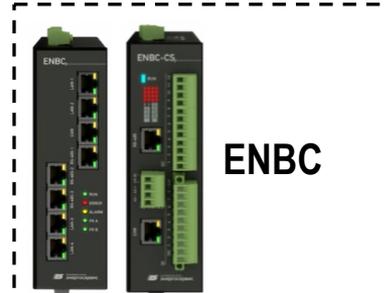
ЭНМИ-6

ПО



ES Phasor

УРЗА



ENBC

АС локализации ОЗЗ по идеологии WAMPAC



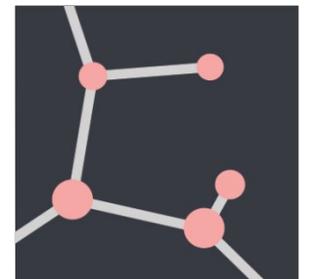
ЭНЛЗ



ЭНКМ-3

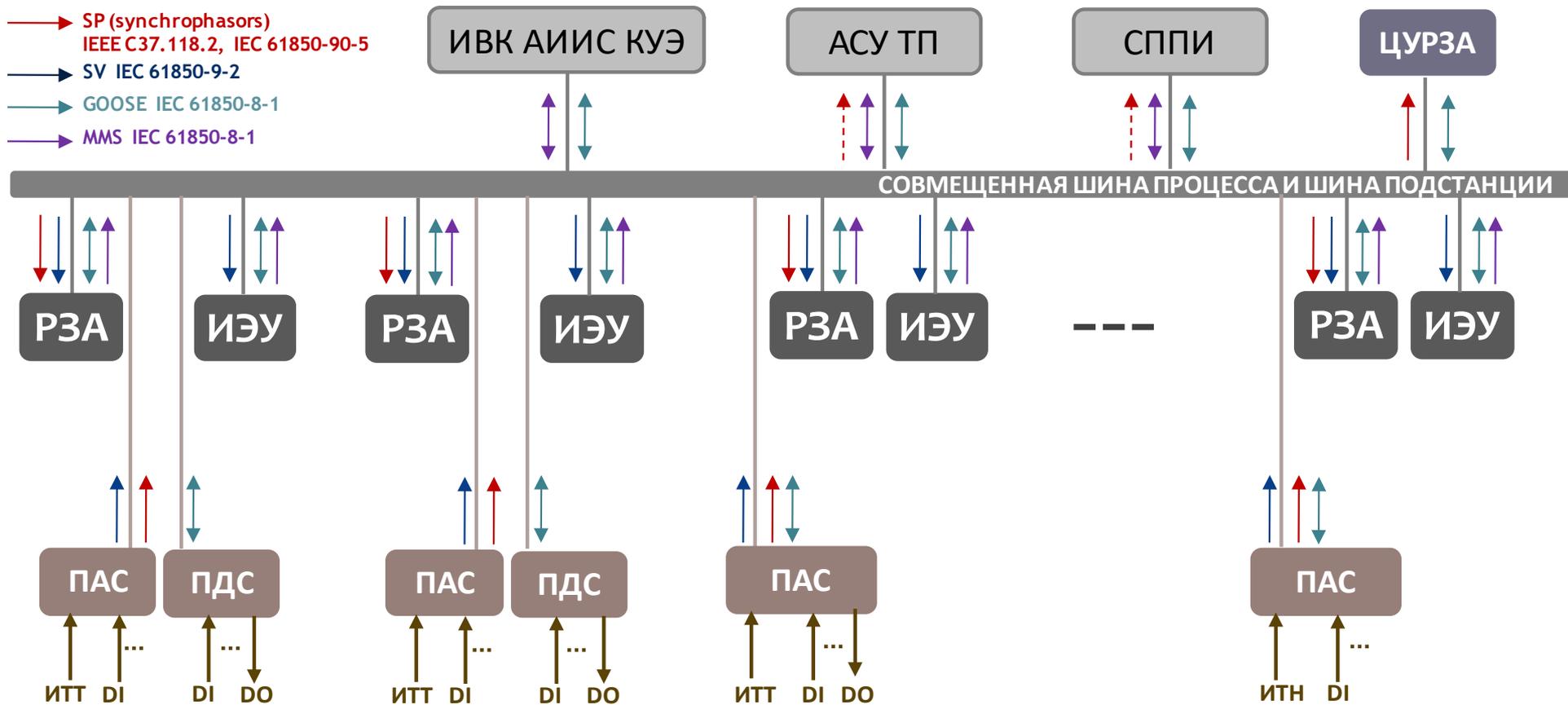


LPCT



ES Graph

- 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

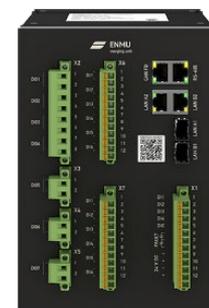
ФИФ №73811-19

МПИ 16 лет

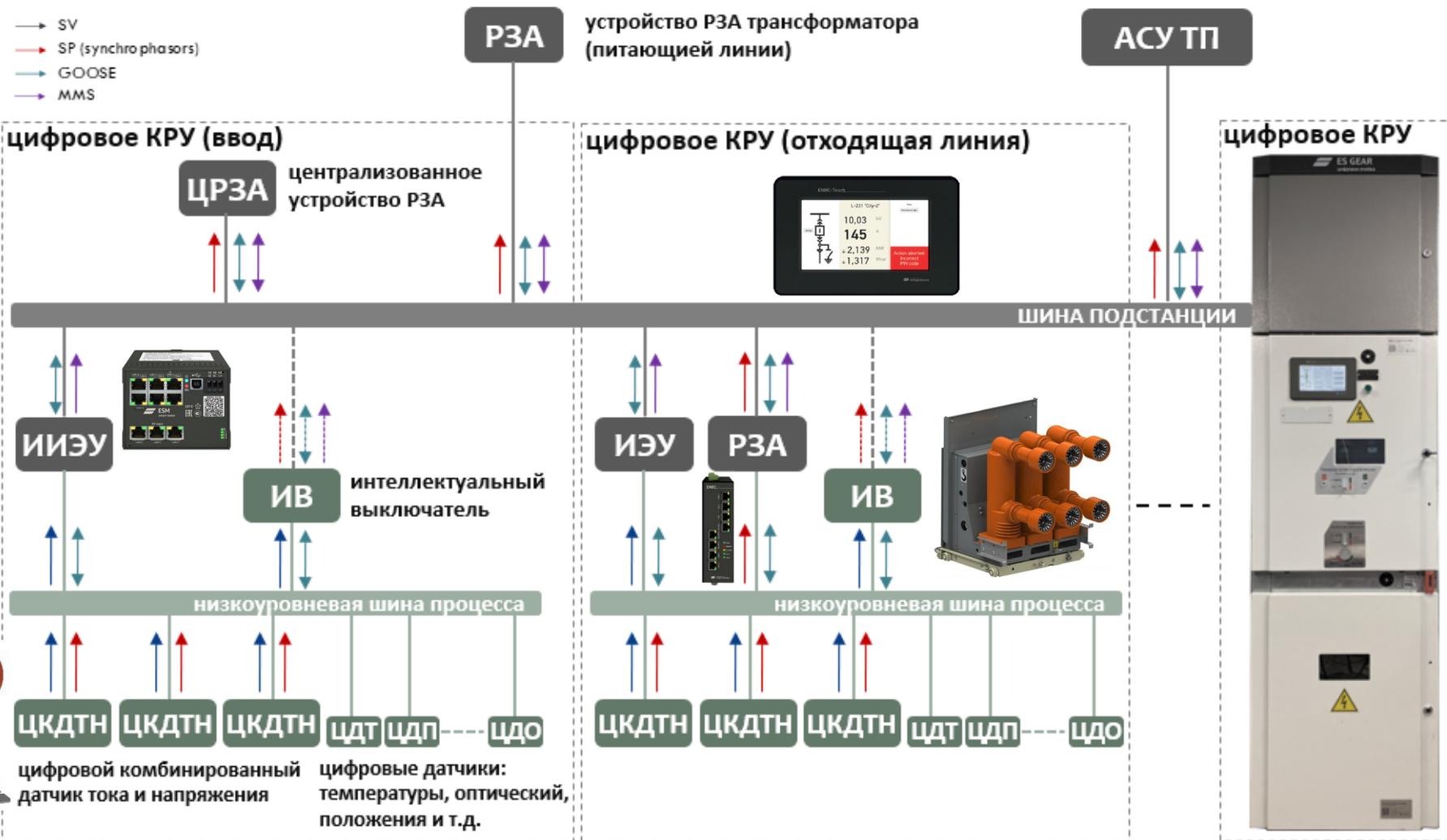


ENMU

NEW



ЦИФРОВОЕ РУ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ



Трёхуровневая распределенная система РЗА: ИВ, РЗА, ЦРЗА.

Преимущественное применение синхровекторов (SP) вместо выборочных значений (SV) токов и напряжений, а также замещение

значительной части MMS-сообщений

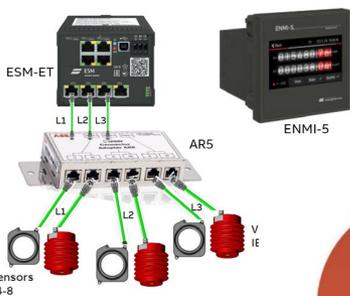
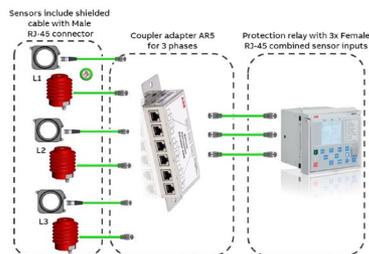
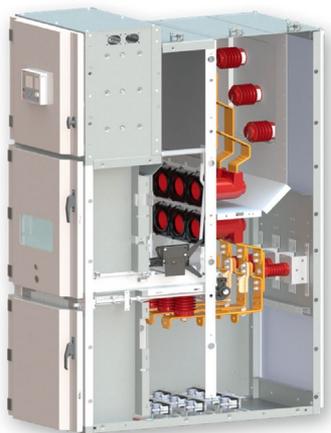
ЦКДТН цифровые комбинированные датчики тока и напряжения (измерения синхровекторов тока и напряжения),

ИВ интеллектуальный выключатель со встроенной резервной защитой,

Цифровые датчики: положения ЦДП, температуры ЦДТ, дуговой защиты ЦДО

UniGear Digital
Statistical energy multimeter
Manufacturer: EnergoService, R U, <https://enip2.ru/en/>

ABB



Current sensors
IEC 60044-8

**Цифровой
комбинированный
трансформатор тока и
напряжения**

Модификации ТЕСV.Р-10:

- с цифровым выходом передачи измерений.

Измерение тока:

- трансформатор тока маломощный LPCT,
- катушка Rogowski.

Измерение напряжения:

- емкостной делитель напряжения.



ЕСИТ

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Номинальная частота f , Гц	50
2.	Класс напряжения, кВ	10
3.	Наибольшее рабочее напряжение $U_{нр}$, кВ	12
4.	Испытательное напряжение 50 Гц, 1 мин, кВ	28
5.	Наибольший рабочий ток $I_{нр}$, А	1250
6.	Ток трехсекундной термической стойкости $I_{тн}$, кА	20
7.	Ток электродинамической стойкости $I_{днп}$, кА	51
8.	Количество измеряемых фаз	1
9.	Значение частоты дискретизации ¹⁾ , Гц	4000; 4800; 12000; 12800; 14400

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Номинальное напряжение переменного тока U_n , В	11000/ $\sqrt{3}$
2.	Класс точности по напряжению для измерений в диапазоне от $0,2 \cdot U_n$ до $1,2 \cdot U_n$ согласно ГОСТ 1983 (ГОСТ Р МЭК 60044-7)	0,5
3.	Предел допускаемой основной относительной погрешности преобразований среднеквадратического значения ¹⁾ напряжения переменного тока для измерений, %	$\pm 0,5$ при $0,2 \cdot U_n \leq U \leq 1,2 \cdot U_n$
4.	Предел допускаемой абсолютной погрешности преобразований угла фазового сдвига между входным и выходным напряжениями переменного тока для измерений, минут	± 20 при $0,2 \cdot U_n \leq U \leq 1,2 \cdot U_n$
5.	Номинальный коэффициент перенапряжения F_v	1,9/8
6.	Класс точности по напряжению для защиты в диапазоне от $0,005 \cdot U_n$ до $1,9 \cdot U_n$ согласно ГОСТ 1983 (ГОСТ Р МЭК 60044-7)	3P
7.	Предел допускаемой основной относительной погрешности преобразований среднеквадратического значения ¹⁾ напряжения переменного тока для защиты, %	± 3 при $0,005 \cdot U_n \leq U \leq 1,9 \cdot U_n$
8.	Предел допускаемой абсолютной погрешности преобразований угла фазового сдвига между входным и выходным напряжениями переменного тока для защиты, минут	± 120 при $0,005 \cdot U_n \leq U \leq 1,9 \cdot U_n$
9.	Номинальный первичный ток I_n , А	100

№	Наименование характеристики	Значение
10.	Номинальный коэффициент превышения первичного тока $K_{пер}$	12,5
11.	Класс точности по току для измерений согласно ГОСТ 7746 (ГОСТ Р МЭК 60044-8)	0,5S
12.	Пределы допускаемой основной относительной погрешности преобразований среднеквадратического значения ¹⁾ силы переменного тока для измерений, %	$\pm 0,75$ при $0,01 \cdot I_n \leq I < 0,05 \cdot I_n$ $\pm 0,5$ при $0,5 \cdot I_n \leq I \leq 12,5 \cdot I_n$
13.	Пределы допускаемой абсолютной погрешности преобразований угла фазового сдвига между входной и выходной силами переменного тока для измерений, минут	± 45 при $0,01 \cdot I_n \leq I < 0,05 \cdot I_n$ ± 30 при $0,5 \cdot I_n \leq I \leq 12,5 \cdot I_n$

Цифровой КДТН ТЕСV.Р-10 со встроенным преобразователем аналоговых сигналов (AMU).



Благодарю за внимание!

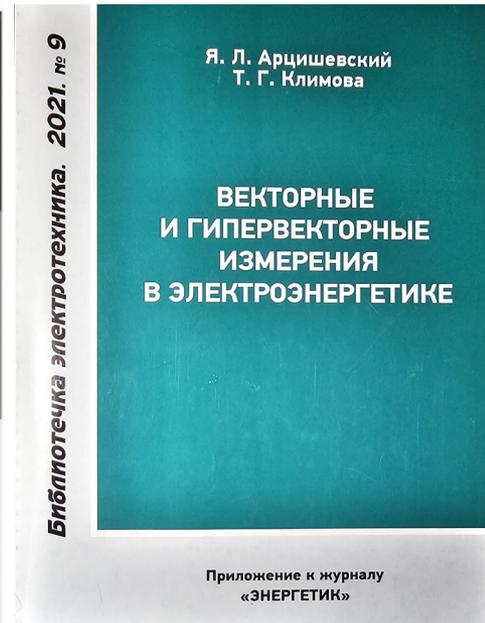
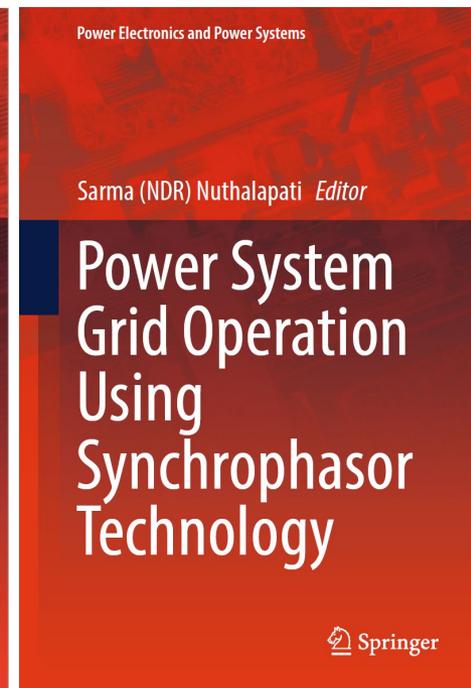
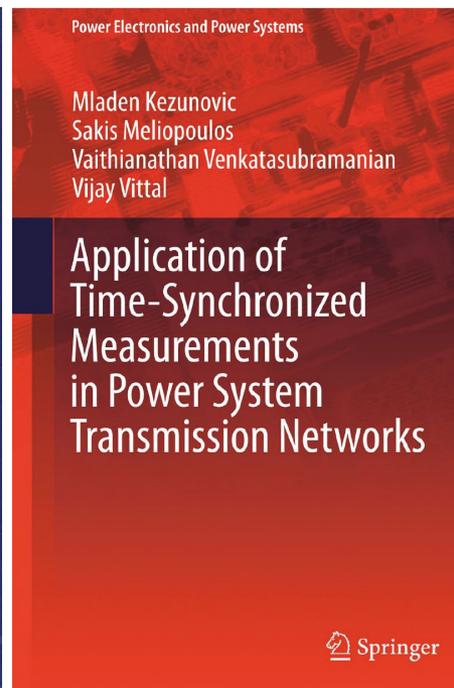
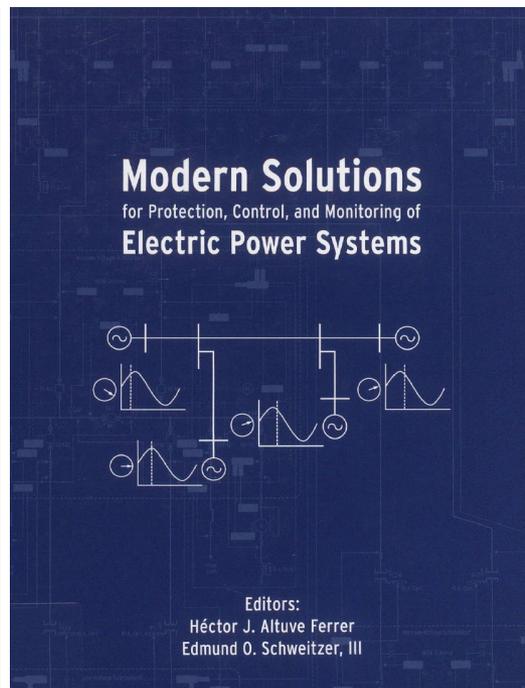
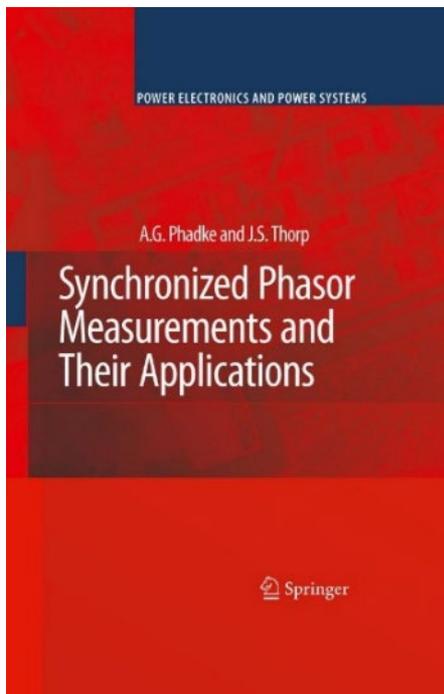
Мокеев Алексей Владимирович

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>



Глава 3.
Технология синхронизированных векторных измерений в системах управления, защиты и автоматики
С. 91-132

IEEE STANDARDS ASSOCIATION



IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems

IEEE Power & Energy Society

Sponsored by the
Power System Relaying CommitteeIEEE
3 Park Avenue
New York, NY 10016-5997
USA
IEEE Std C37.118.2™-2011
(Revision of
IEEE Std C37.118™-2005)

28 December 2011



IEC/IEEE 60255-118-1

Edition 1.0 2018-12

INTERNATIONAL STANDARD


 Measuring relays and protection equipment –
Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements
INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

ICS 28.120.70

ISBN 978-2-8322-6172-9

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИНАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИГОСТ Р
59365—
2021
 Единая энергетическая система
и изолированно работающие энергосистемы
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА
Система мониторинга переходных режимов.
Нормы и требования

Издание официальное

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИНАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИГОСТ Р
59365—
2021Единая энергетическая система и изолированно
работающие энергосистемы

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

Система мониторинга переходных режимов.
Устройства синхронизированных векторных
измерений. Нормы и требования

Издание официальное

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИНАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИГОСТ Р
59366—
2021Единая энергетическая система и изолированно
работающие энергосистемы

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

Система мониторинга переходных режимов.
Концентраторы синхронизированных векторных
данных. Нормы и требования

Издание официальное


<https://naspi.org/>,

https://ieeexplore.ieee.org,

<https://www.cigre.org/>,

<https://www.sgsma2022.org/>

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

CIGRE Session, Paris, France 2018, 2020, 2022, 2024

NASPI webinar 2021

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

Relay Protection and Automation, International Scientific and Technical Conference, Moscow, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023

Релейная защита и автоматика энергосистем (РНК СИГРЭ) 2021, 2023

Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики, международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко, 2021, 2022, 2023

РЕЛАВЭКСПО 2021, 2023

Научно-практическая конференция «Релейная защита и автоматизация энергосистем. совершенствование эксплуатации и перспективы развития» на форуме «Электрические сети» 2021, 2022, 2023

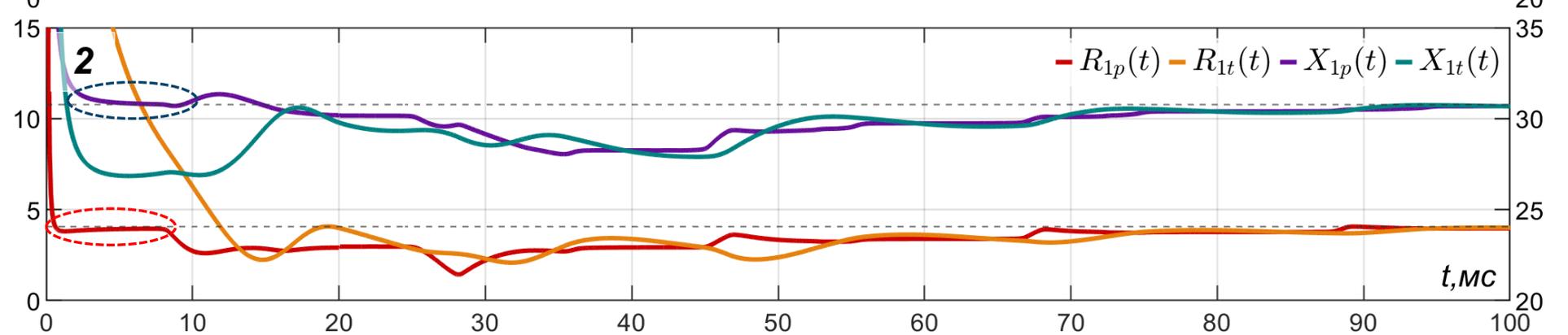
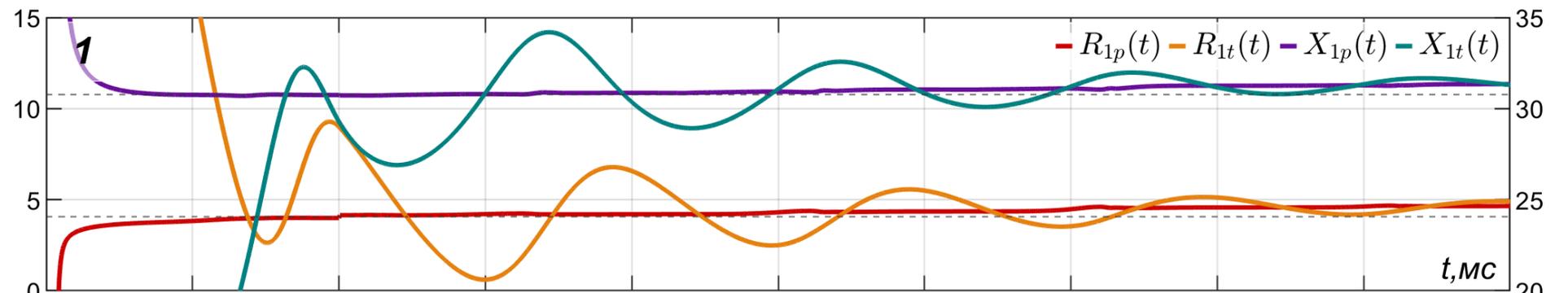
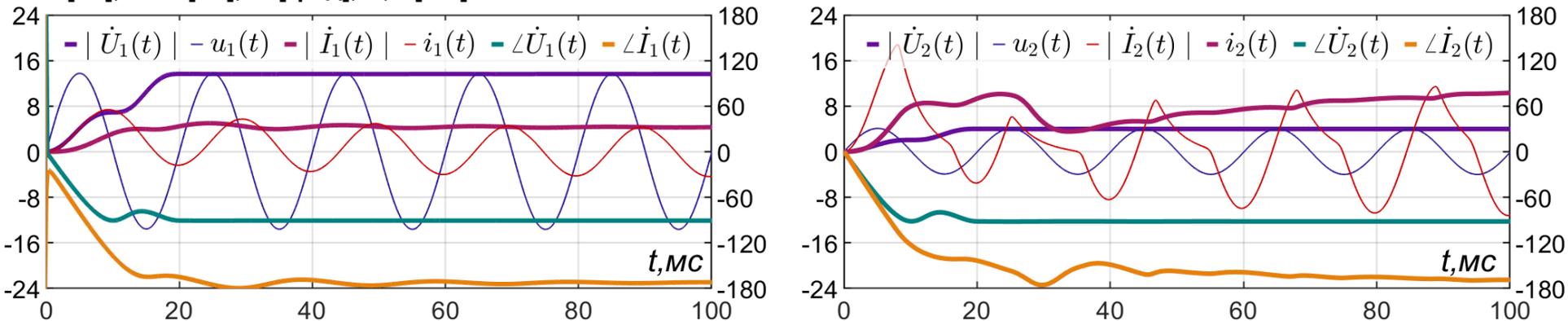
Некоммерческое партнерство «Научно-технический совет Единой энергетической системы» 2021, 2022



№	EN	RU
1	phasor	комплексная амплитуда
2	synchrophasor	синхронизированный вектор (синхровектор)
3	SPM synchronized phasor measurement	СВИ синхронизированные векторные измерения
4	PMU Phasor Measurement Unit	УСВИ устройства синхронизированных векторных измерений
5	WAMS Wide Area Monitoring System	СМПР система мониторинга переходных режимов
6	WACS Wide Area Control System	автоматизированные системы управления
7	WAPS Wide Area Protection System	системы релейной защиты и автоматики
8	WAMPAC Wide Area Monitoring, Control and Protection System	автоматизированные системы мониторинга, управления, защиты и автоматики

Оценка R, X при насыщении измерительных трансформаторов тока

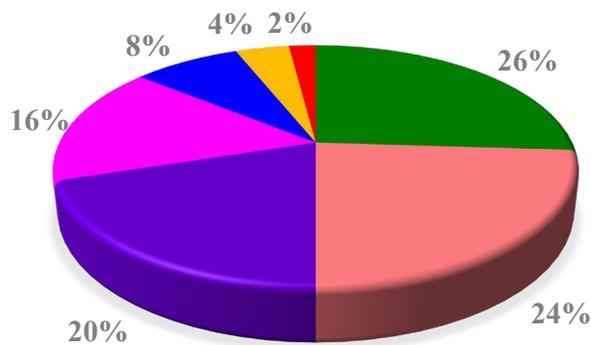
i [кА], $u \cdot 10$ [кВ], \angle [град], R, X [Ом]



Механизм повреждения	Виды дефектов	Диагностический параметр
Электромагнитные силы, вызванные током КЗ	Деформация обмотки	Изменение индуктивного сопротивления продольной ветви
Повреждение изоляции, образующее контур, сцепленный с основным магнитным потоком	Межвитковое замыкание: а) полное замыкание двух или нескольких витков; б) замыкание двух или нескольких параллельных проводников, принадлежащих разным виткам	Изменение тока намагничивания и потерь холостого хода
Повреждение изоляции, образующее контур, сцепленный с потоком рассеяния	Замыкание параллельных проводников; витковые замыкания в обмотках трансформатора, встроенных в трансформатор реакторов и регулировочных трансформаторов; повреждение изоляции прессующих винтов	Изменение потерь короткого замыкания
Ухудшенный контакт и перегрев контактов отводов РПН или ПБВ, образование пленки, эрозия поверхностей, увеличение переходного сопротивления	Перегрев и эрозия контактов	Изменение активного сопротивления продольной ветви
Механическое смещение или перегрев проводника, его обрыв или перегорание	Обрыв цепи	Изменение тока намагничивания и потерь холостого хода; изменение активного сопротивления продольной ветви
Механические воздействия или перевозбуждение, повреждение изоляции элементов магнитопровода и образование контура, сцепленного с основным магнитным потоком	Закорачивание листов электротехнической стали, нарушение изоляции стяжных шпилек, ярмовых балок и др.	Изменение тока намагничивания и потерь холостого хода

Статистика зафиксированных событий за 2022 г.

Количество



Несимметрия напряжений – 26 %

Броски нагрузки – 24 %

Отклонения напряжения – 20 %

Однофазные замыкания в сети – 16 %

Холостой ход – 8 %

Сквозные токи КЗ – 4 %

Отключение трансформатора – 2 %

13 событий

12 событий

10 событий

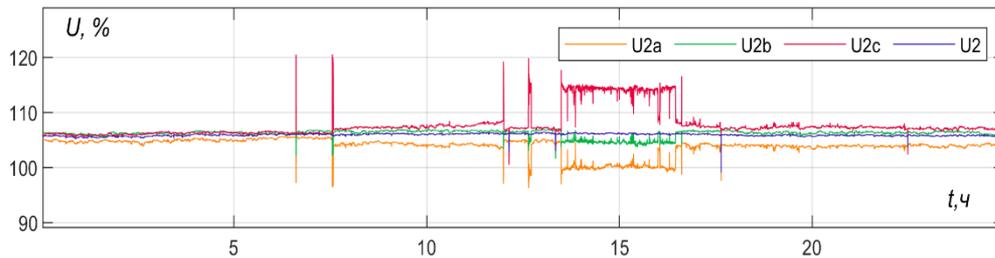
9 событий

4 события

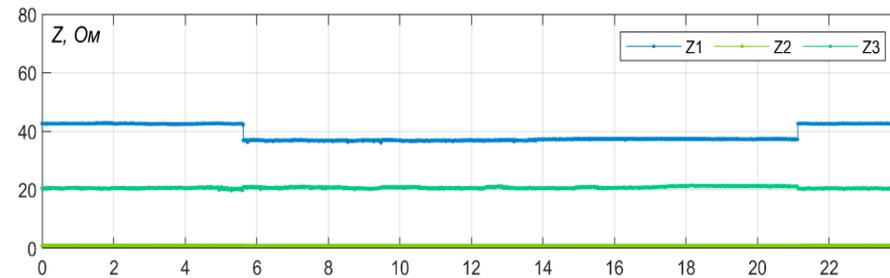
2 события

1 событие

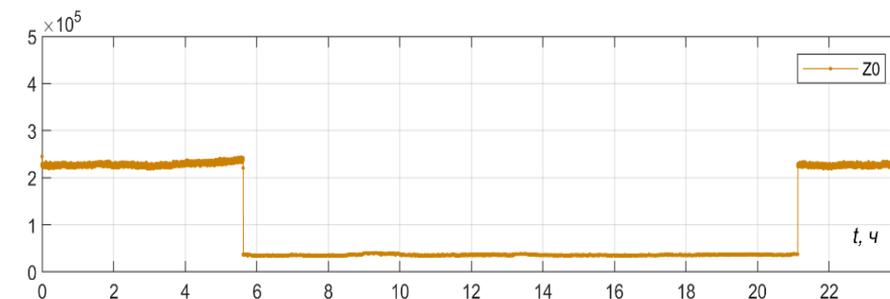
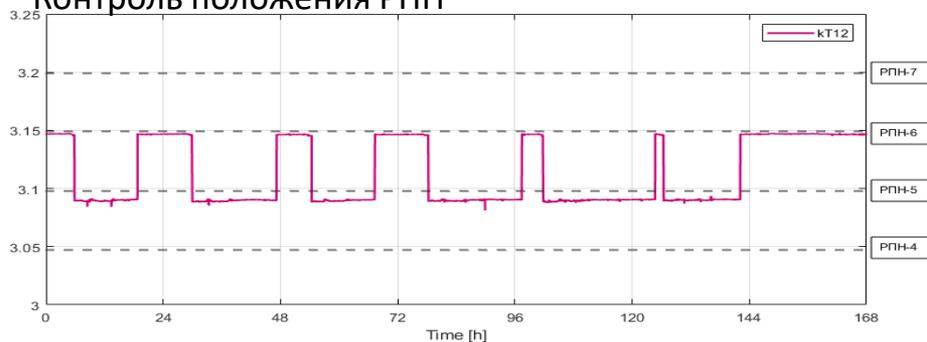
Несимметрия напряжений СН



Контроль параметров схемы замещения



Контроль положения РПН



ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Направленная защита НП при использовании эквивалентных синхровекторов высших гармоник

