



инженерный центр  
**энергосервис**



# Применение технологии синхронизированных векторных измерений в системах управления, мониторинга, релейной защиты и автоматики энергосистем

*Мокеев А.В., Пискунов С.А.*

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

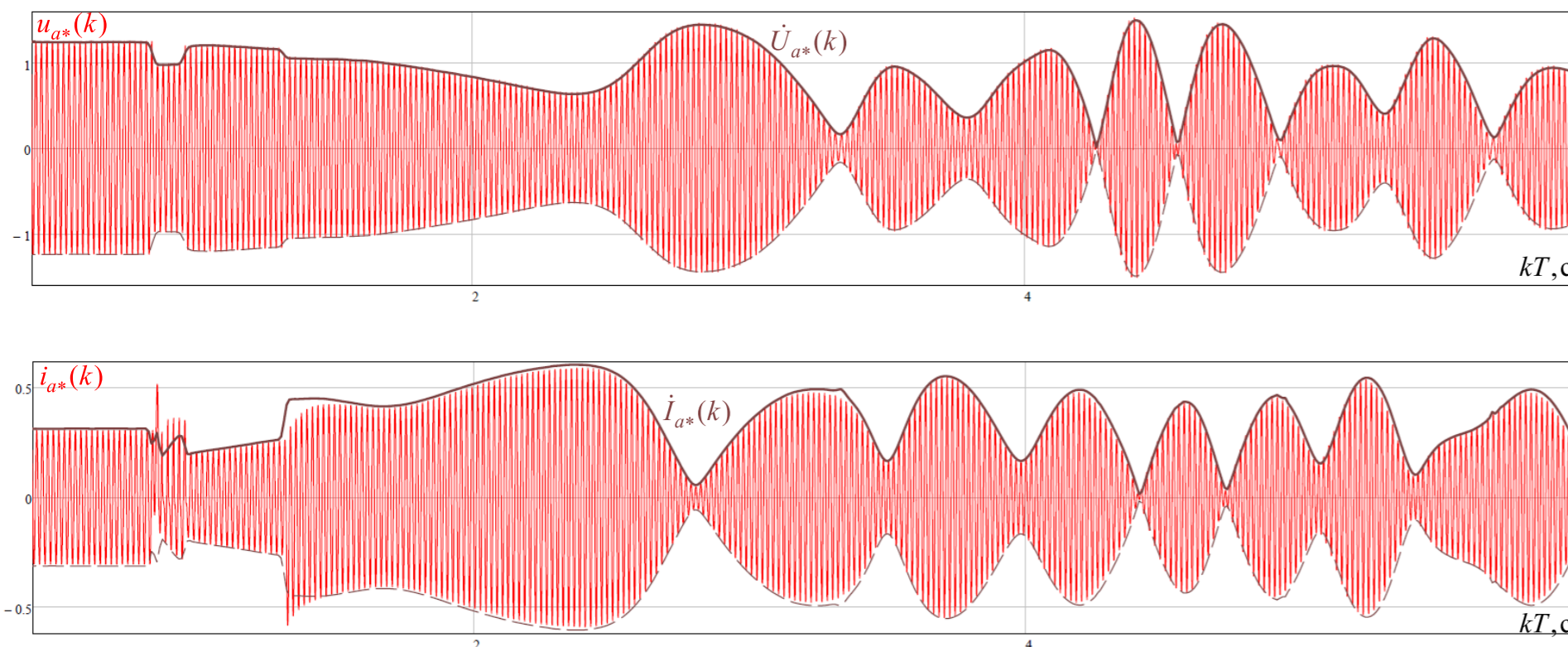
Научно-практическая конференция

*«Релейная защита и автоматизация энергосистем. Совершенствование эксплуатации и перспективы развития»*

Москва, 24 ноября 2022 г.

## Определение синхровектора и мгновенной частоты

$$\dot{U}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m(t) e^{j\varphi(t)} \quad \omega(t) = \omega_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt}$$



- точная оценка синхровекторов тока и напряжения при электромеханических переходных процессах;
- высокая точность синхронизации времени (1 мкс);
- измерение мгновенной частоты;
- высокий темп передачи данных ( $\geq 50$  раз/сек);
- возможностью расчета на базе синхровекторов около сотни параметров режима энергосистемы на любом уровне управления;
- при использовании эквивалентных синхровекторов – расчет параметров режима с учетом высших гармоник;
- оценка параметров схемы замещения энергосистемы.

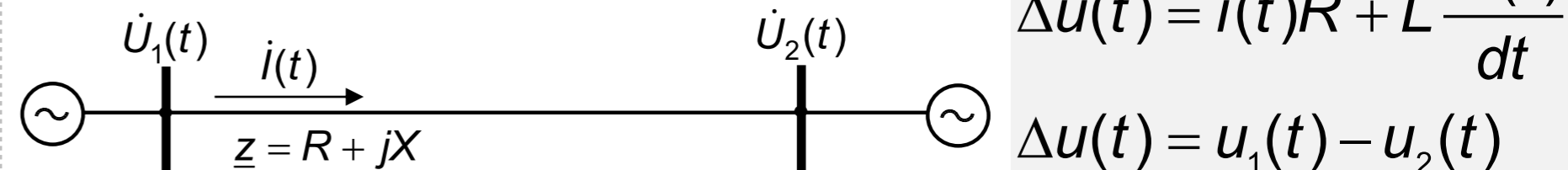
Развитие теории СВИ позволит повысить техническое совершенство систем релейной защиты, автоматики, мониторинга и управления и позволит приступить к реализации распределенных систем WAMPACS.

Актуальными являются задачи, связанные с определением синхровекторов (синхрофазоров) электромеханических и электромагнитных переходных процессов. Исследования синхровекторов 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 тока и напряжения;
- обеспечение правильной работы РЗА в условиях электромагнитных переходных процессов;
- повышение темпа передачи синхровекторов;
- внесение изменений в протокол IEEE C37.118.2 или передача синхровекторов с использованием протокола IEC 61850-9-2;
- обеспечение надежной синхронизации устройств РЗА;
- разработка новых тестов для испытаний устройств РЗА с поддержкой СВИ.

## ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ,  
ВИРТУАЛЬНЫЙ УСВИ

$$\Delta u(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt}$$

$$\Delta u(t) = u_1(t) - u_2(t)$$

Символический метод (метод комплексных амплитуд):

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

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

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

$$\Delta \dot{U} = \underline{z} \dot{i}$$

$$\underline{z} = \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{i}}$$

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

Синхровекторы (синхрофазоры):

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

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

$$\underline{z}_k \neq \frac{\dot{U}(t)}{\dot{i}(t)}$$

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

$$\underline{z} \neq \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{i}(t)}$$

$$\dot{U}_2 \neq \dot{U}_1 - \underline{z} \dot{i}$$

**Публикации**

Мокеев А.В. Анализ синхровекторов переходных процессов в энергосистеме // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022, №1. – С.62-70.

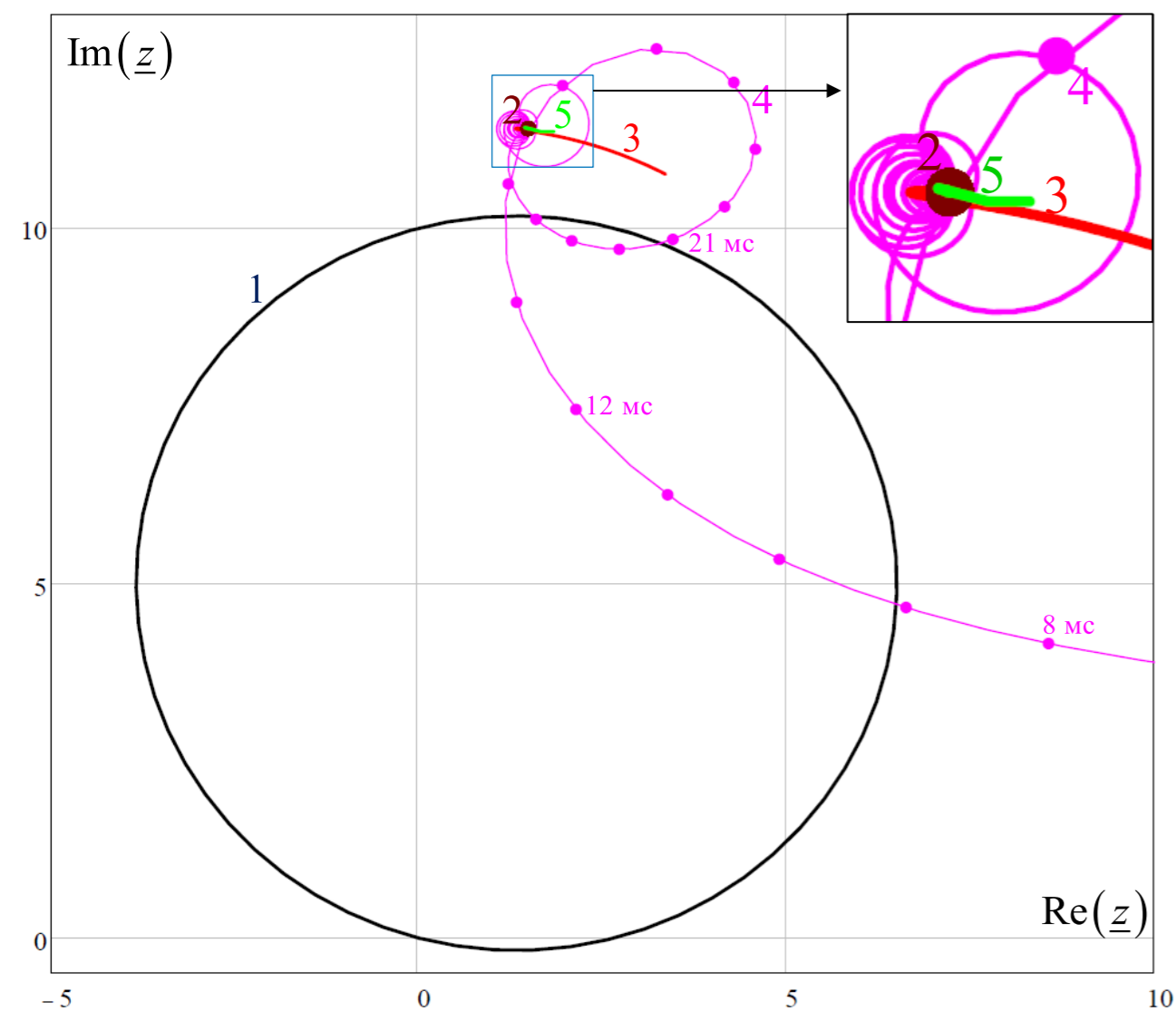
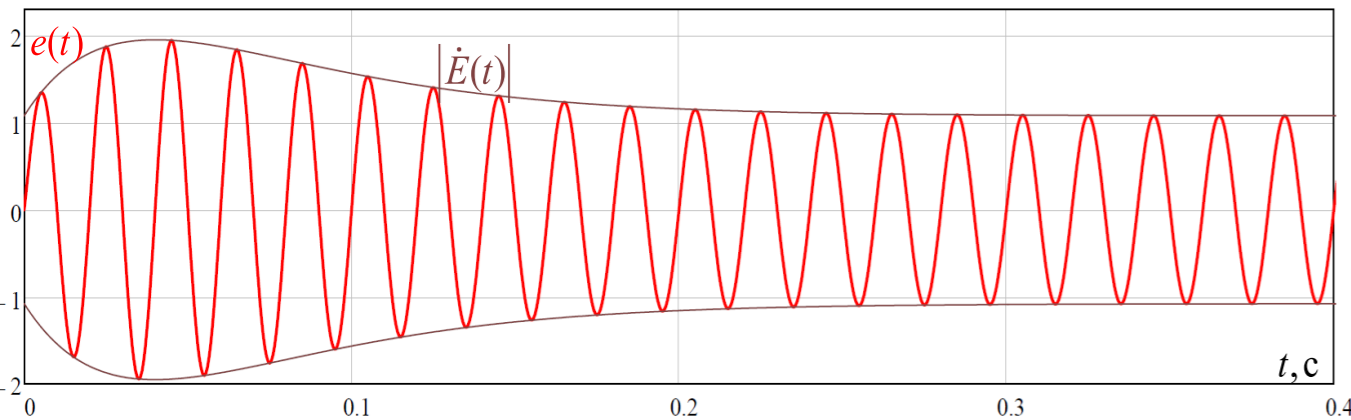
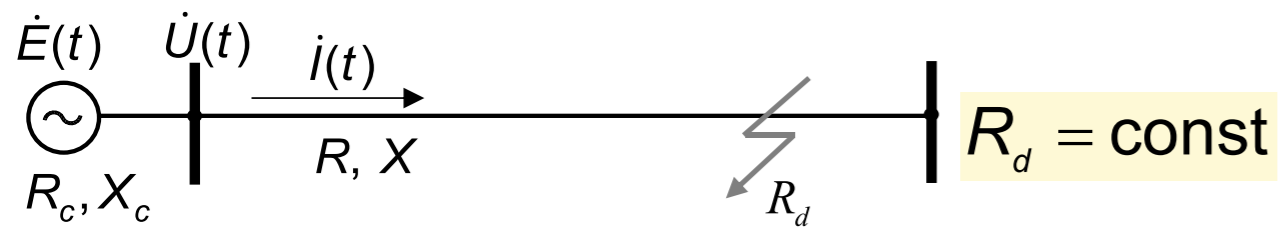
Popov I.A., Butin K.P., Dubinin D.M., Rodionov A.V., Mokeev A.V., Piskunov S.A. Examples of processing low-frequency oscillations in Russia and ways to improve the analysis // The 2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics – SGSMA, Split, Croatia, May 24h-26th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

Мокеев А.В., Пискунов С.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для совершенствования дистанционной защиты // Релейная защита и автоматизация. – 2022, № 3. – С.4-9.

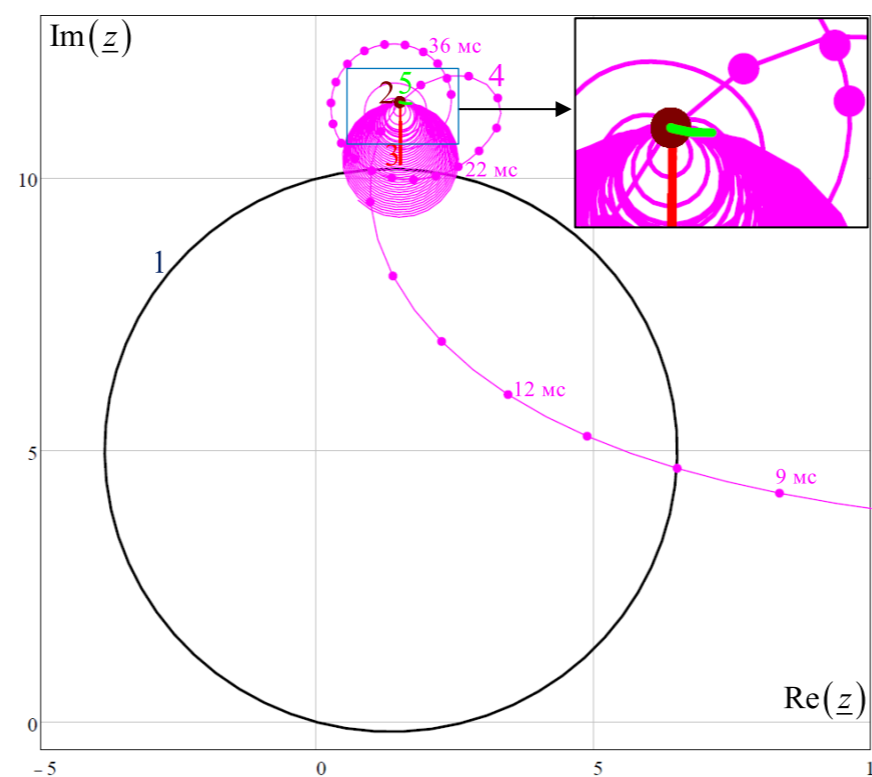
Мокеев А.В., Пискунов С.А. Совершенствование дистанционной защиты на основе СВИ в условиях переходных процессов при учете влияния дуги // Релейная защита и автоматизация. – 2022, № 4 (в процессе публикации).

Мокеев А.В., Пискунов С.А. Повышение эффективности дистанционной защиты линии на основе СВИ в условиях переходных процессов и при учете влияния дуги // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 73. – ИСЭМ СО РАН. – 2022 (в процессе публикации).

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЕТЛИ КЗ



№	Наименование	Выражение (схема)
1	Дифференциальное уравнение (ДУ)	$u(t) = i(t)R_{\Sigma} + L \frac{di(t)}{dt}$ , $R_{\Sigma} = R + R_d$
2	ДУ после преобразований	$\dot{U}(t) = \underline{z}i(t) + L \frac{di(t)}{dt}$ , $\underline{z} = R_{\Sigma} + j\omega_0 L$
3	Введем переменную	$\underline{z}_0(t) = \frac{\dot{U}(t)}{i(t)} = R_0(t) + jX_0(t)$
4	Итоговое выражение	$\underline{z}_0(t) = \underline{z} + L \frac{\dot{i}(t)}{i(t)}$ , где $\dot{i}(t) = \frac{di(t)}{dt}$
5	Определение $L$	$L = X_0(t) \left( \omega_0 + \text{Im} \left( \dot{i}(t) / i(t) \right) \right)^{-1}$
6	Определение $R_{\Sigma}$	$R_{\Sigma} = R_0(t) - L \text{Re} \left( \dot{i}(t) / i(t) \right)$
7	Определение $R_d$	$R_d = R_{\Sigma} - \frac{L}{L_{yD}} R_{yD}$
8	Определение $R$	$R = R_{\Sigma} - R_d$



$$\dot{E}(t) = E_m e^{-j(\varphi + \pi R_f t^2)} \quad \omega(t) = \omega_0 - 2\pi R_f t, \quad R_f = 10$$

- 1 характеристика срабатывания
- 2 сопротивление процесса по предлагаемому алгоритму (ист. значение)
- 3 годограф сопротивления процесса  $\dot{U}(t)/i(t)$
- 4 годограф оценки сопротивления  $\dot{U}(t)/i(t)$  при использовании алгоритма Фурье (АФ)
- 5 годограф оценки сопротивления по предлагаемому алгоритму при использовании АФ

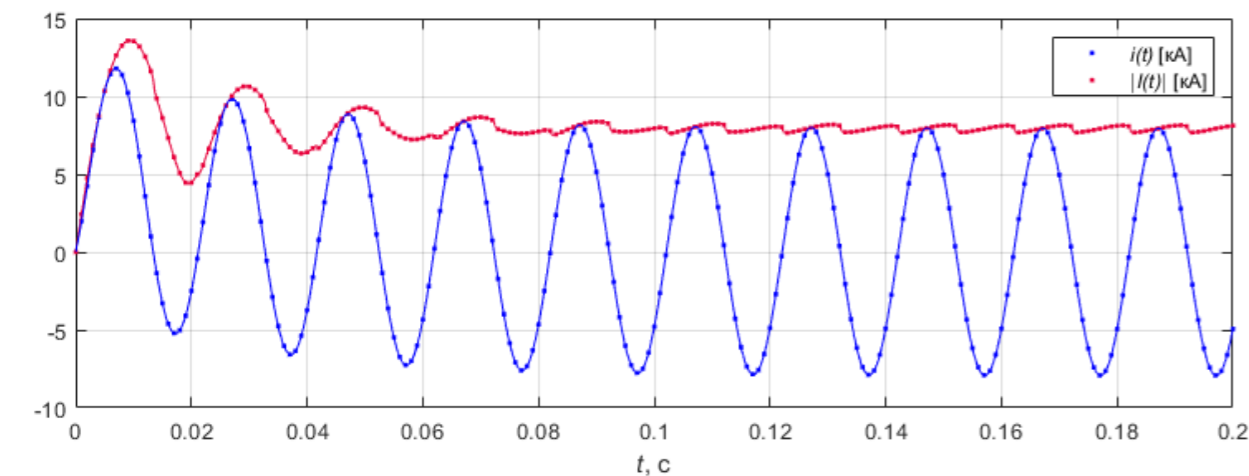


$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dR_d(t)}{dt} = -\frac{R_d(t)}{\tau} \left( \frac{[\operatorname{Re}(i(t)e^{j\omega_0 t})]^2 R_d(t)}{P_0} - 1 \right) \\ \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L_\Sigma} (\dot{E}(t) - (z_\Sigma + R_d(t))i(t)) \end{array} \right.$$

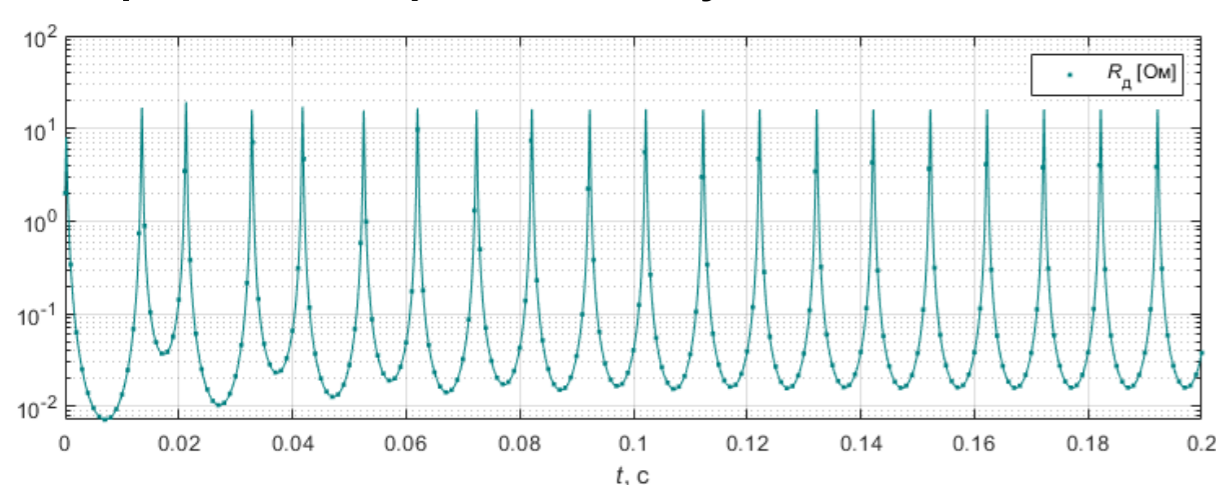
$$z_\Sigma = R_\Sigma + j\omega_0 L_\Sigma, \quad R_\Sigma = R + R_c$$

$\tau$  – постоянная времени дуги,  
 $P_0$  – рассеиваемая мощность дуги

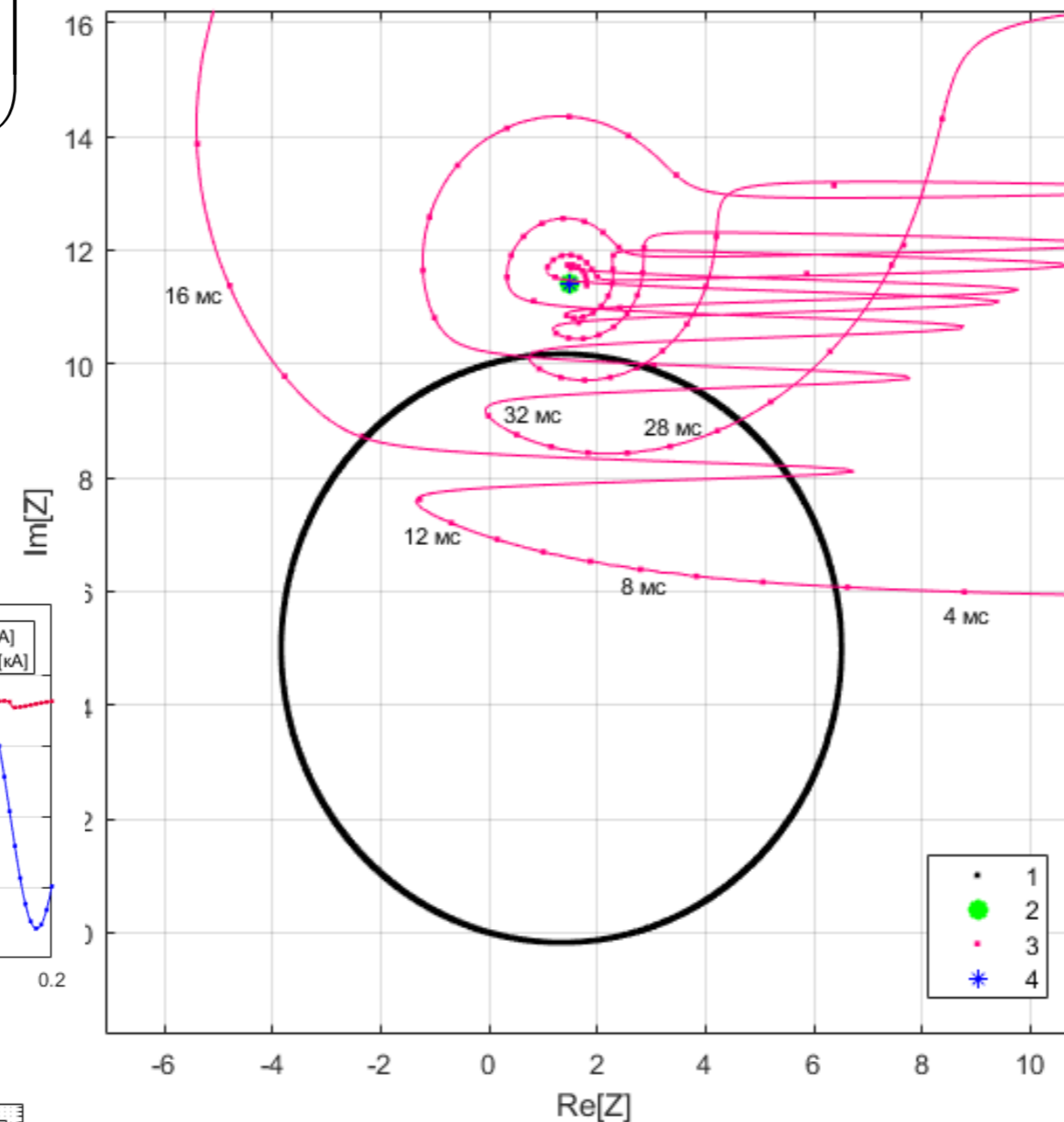
Ток и модуль полного синхровектора тока



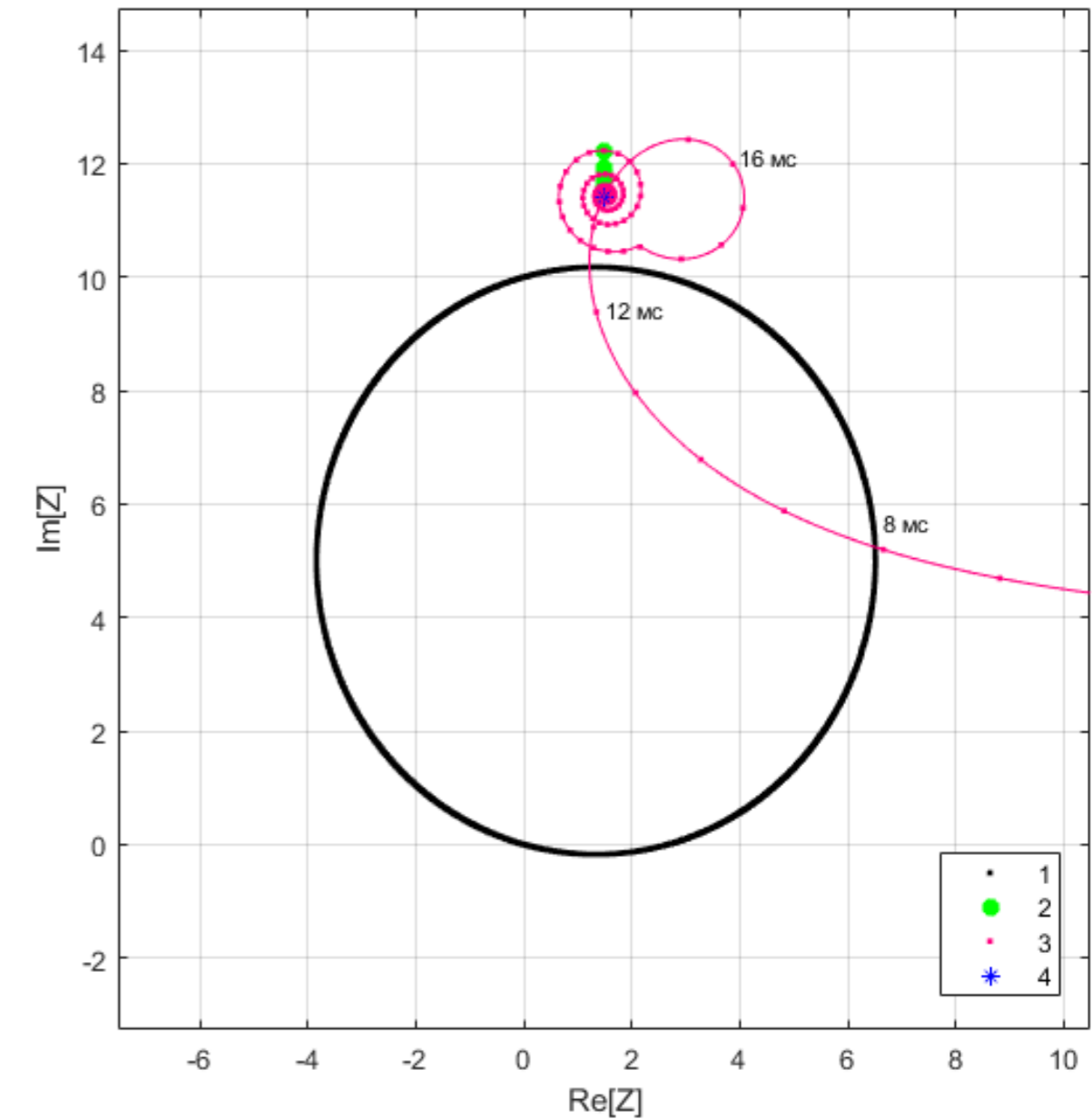
Переходное сопротивление дуги



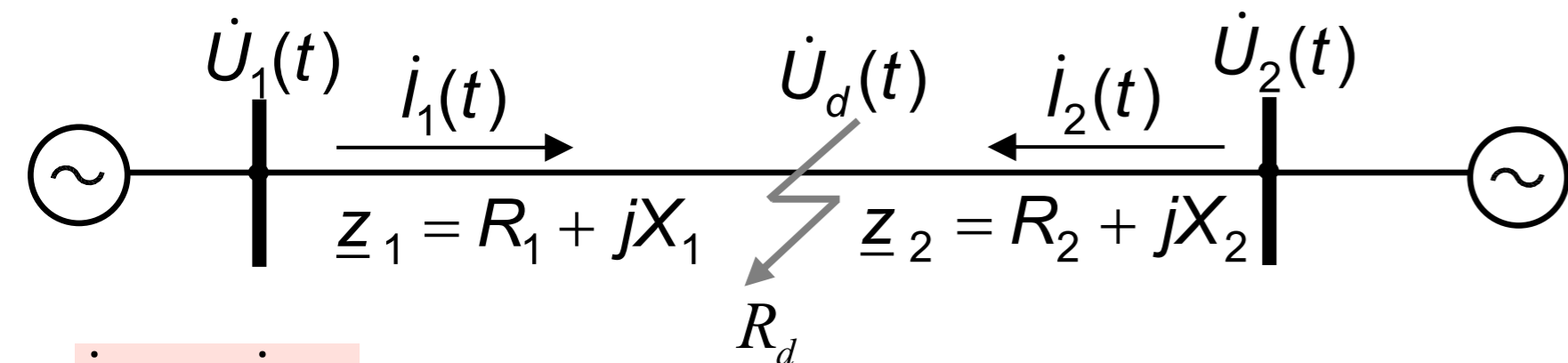
сопротивление процесса



оценка сопротивления



- 1 характеристика срабатывания
- 2 традиционный алгоритм и АФ
- 3 предлагаемый алгоритм и АФ
- 4 истинное значение



$$i_1(t) = i_2(t)$$

$$L = \text{Im} \left( \frac{\Delta \dot{U}(t)}{i_1(t)} \right) \left( \omega_0 + \text{Im} \left( \frac{i_1'(t)}{i_1(t)} \right) \right)^{-1}$$

$$R = \text{Re} \left( \frac{\Delta \dot{U}(t)}{i_1(t)} \right) - L \text{Re} \left( \frac{i_1'(t)}{i_1(t)} \right)$$

$$i_1(t) \neq i_2(t)$$

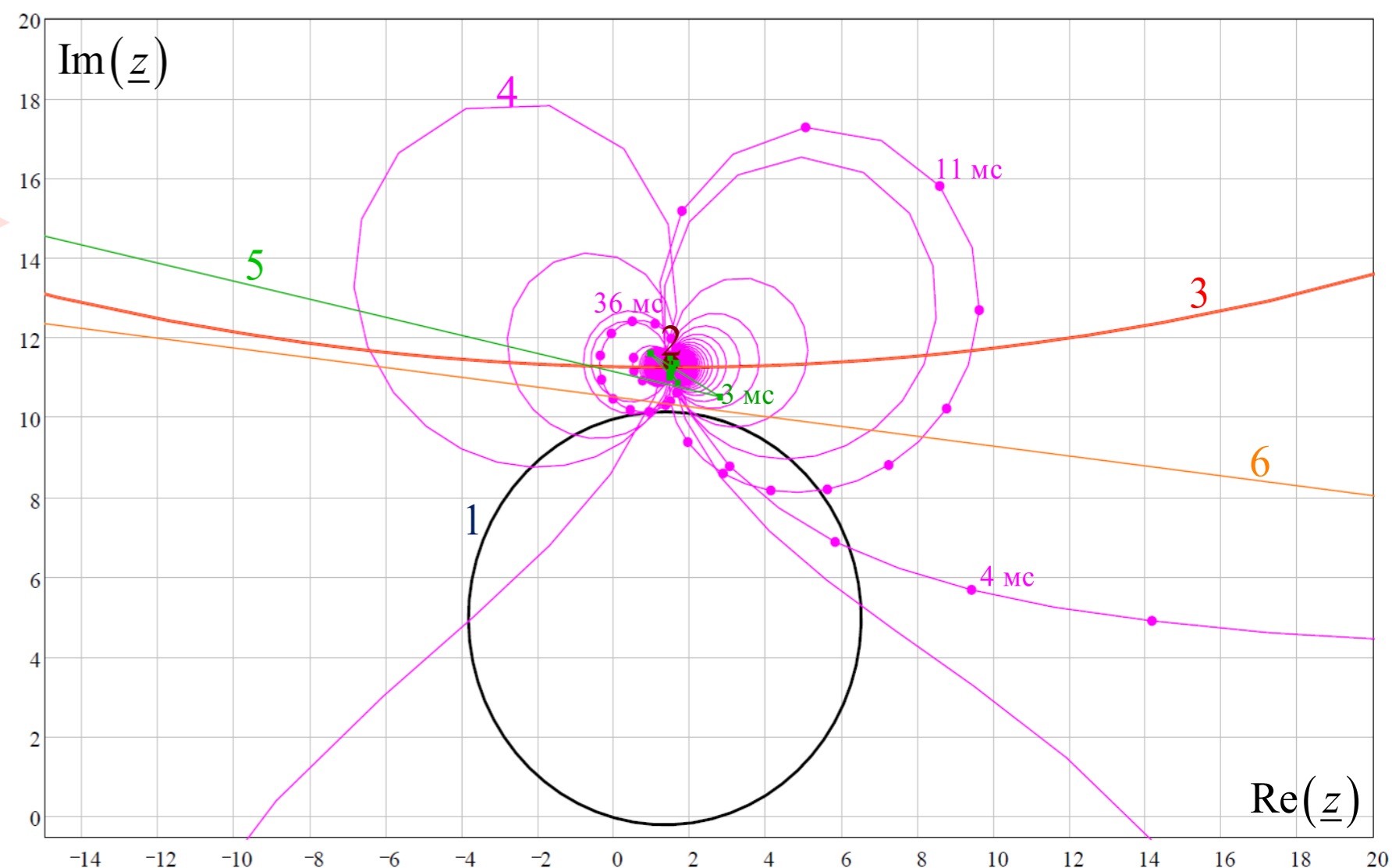
$$L_1 = \text{Im} (z_1(t)) \left( \omega_0 + \text{Im} \left( \frac{i'(t)}{i(t)} \right) \right)^{-1}$$

$$R_1 = \text{Re} (z_1(t)) - L_1 \text{Re} \left( \frac{i'(t)}{i(t)} \right)$$

где  $i(t) = i_1(t) + i_2(t)$ ,  $z_1(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + z_{\pi} i_2(t) + L_{\pi} i_2'(t)}{i(t)}$ ,

$$\Delta \dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t), \quad i'(t) = \frac{di(t)}{dt}$$

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРИ АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ



1 характеристика срабатывания

2 сопротивление процесса по предлагаемому алгоритму (ист. значение)

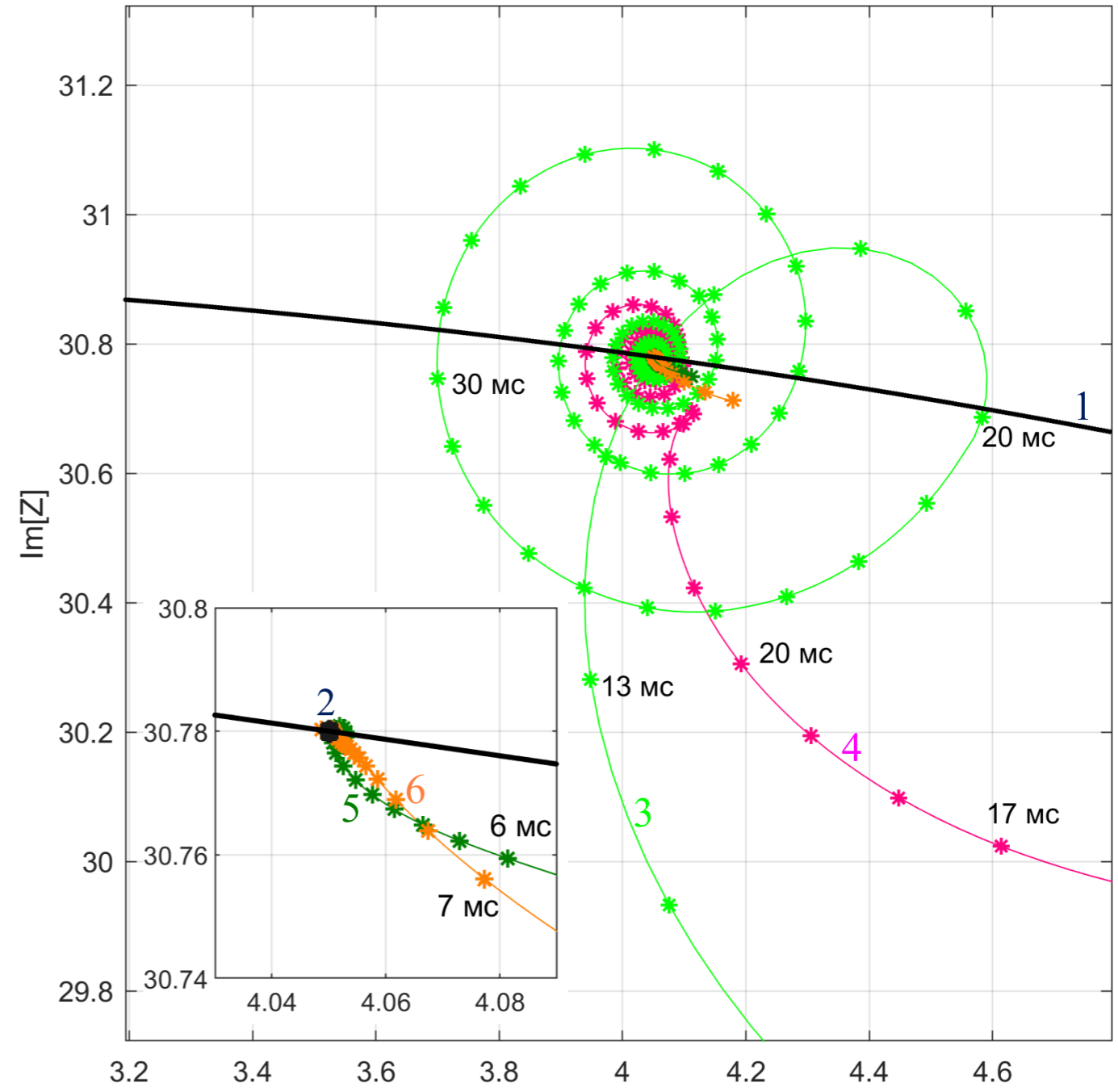
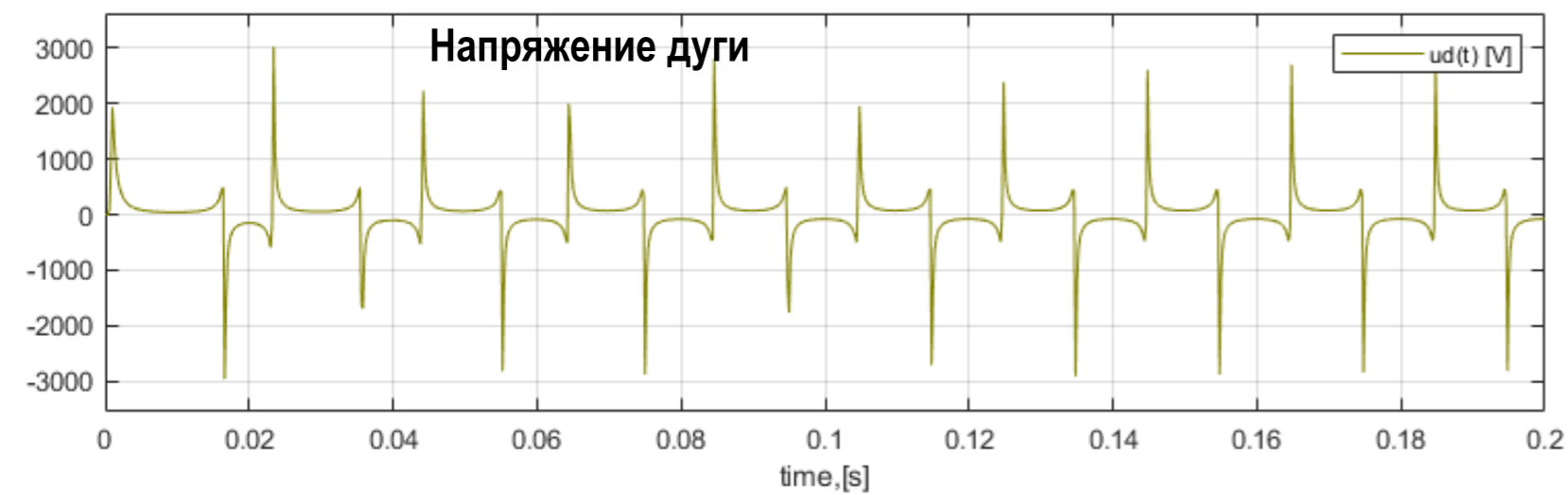
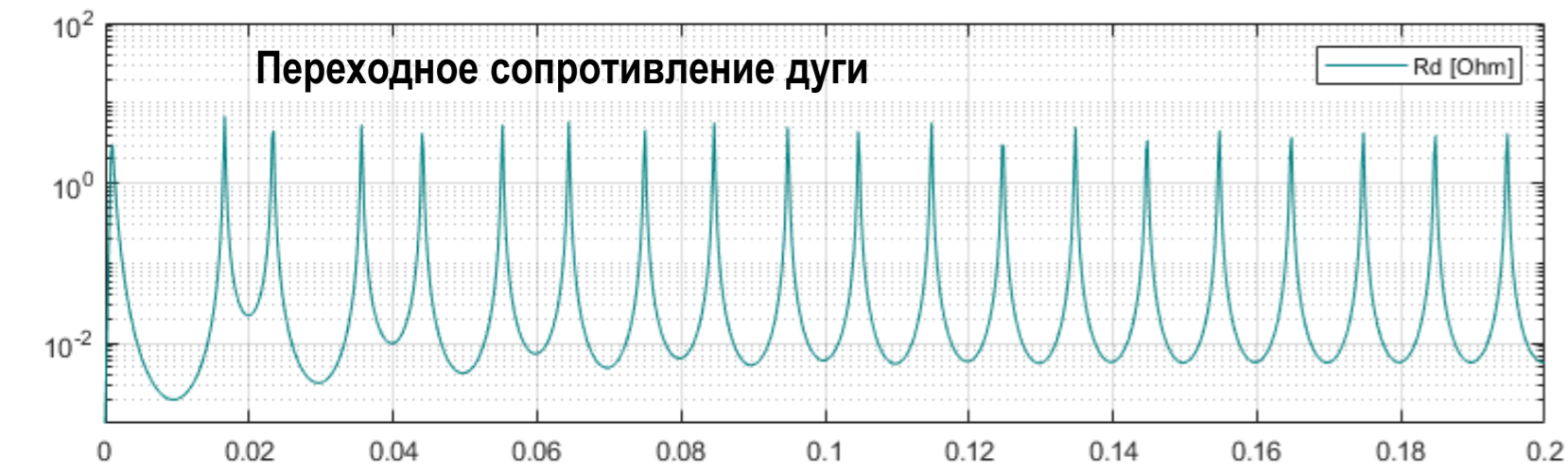
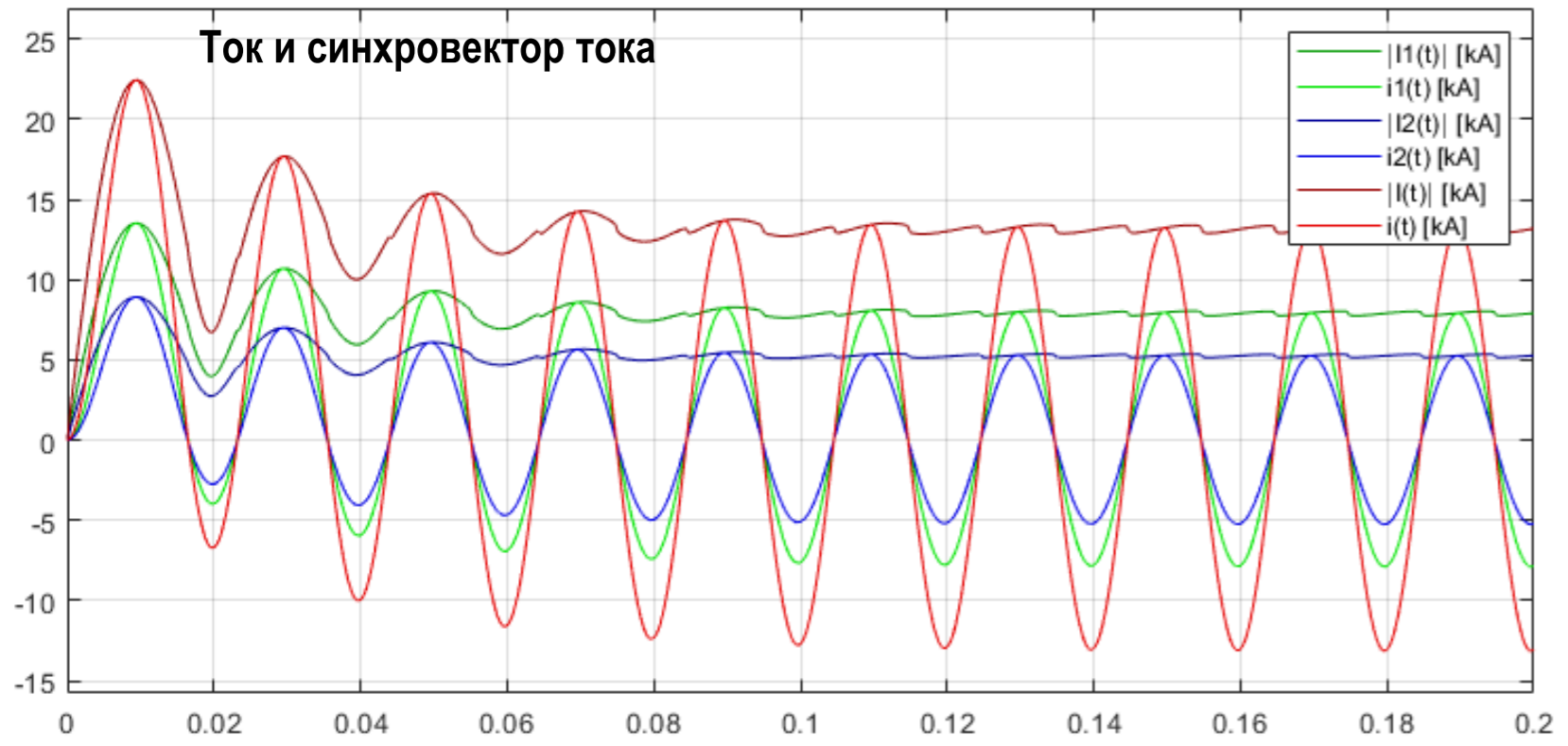
3 годограф сопротивления процесса  $\Delta \dot{U}(t)/i(t)$

4 годограф оценки сопротивления  $\Delta \dot{U}(t)/i(t)$  при использовании АФ

5 годограф оценки сопротивления по предлагаемому алгоритму и при использовании АФ

6 годограф сопротивления  $\dot{U}_1(t)/i(t)$

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЕТЛИ КЗ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ ИЗМЕРЕНИИ



Традиционный алгоритм

$$\underline{z}_1(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + \underline{z}_n i_2(t)}{i(t)} = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + \underline{z}_n i_2(t)}{i_1(t) + i_2(t)}$$

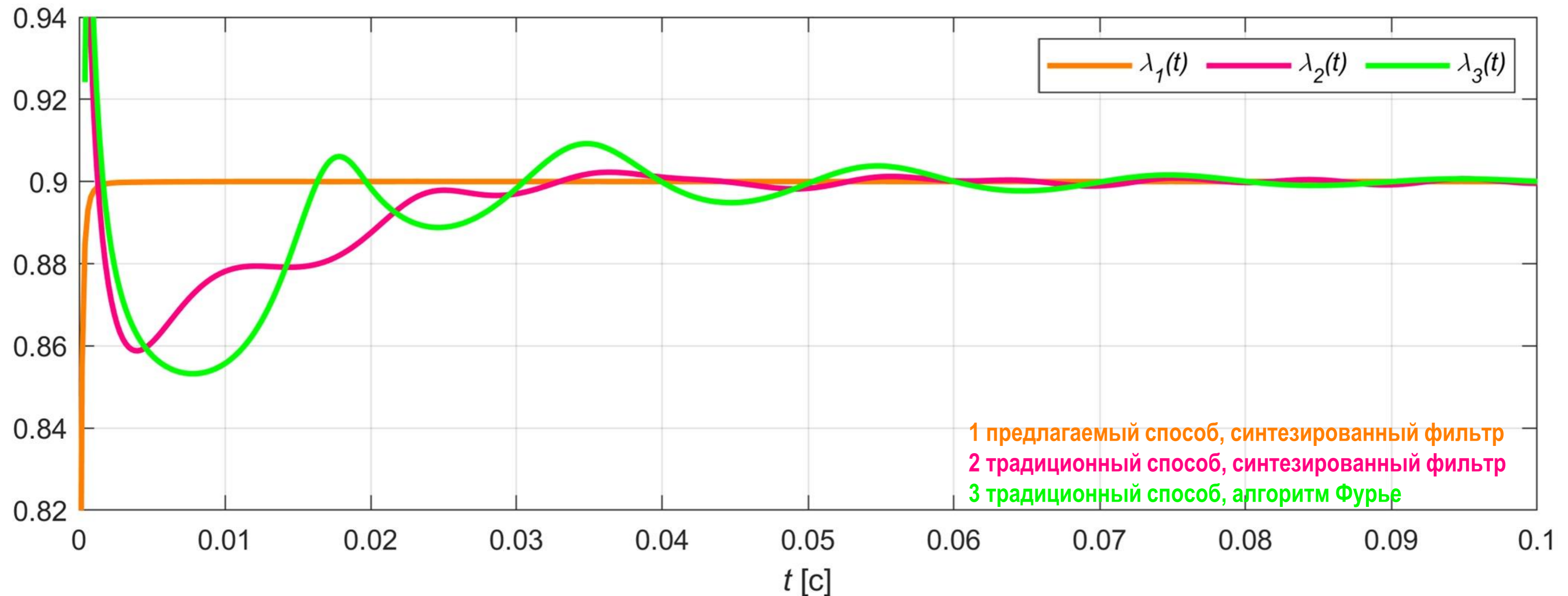
- традиционный способ, синтезированный фильтр
- традиционный способ, через алгоритм Фурье
- предлагаемый способ, синтезированный фильтр
- предлагаемый способ, через алгоритм Фурье
- характеристика срабатывания I ступени ДЗ

Известный алгоритм ОМП

$$\lambda = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_1(t) + z_{\text{л}} \dot{i}_2(t)}{z_{\text{л}} (i_1(t) + i_2(t))} = \frac{\Delta \dot{U}(t) + z_{\text{л}} \dot{i}_2(t)}{z_{\text{л}} \dot{i}(t)}^*$$

Предлагаемый алгоритм ОМП

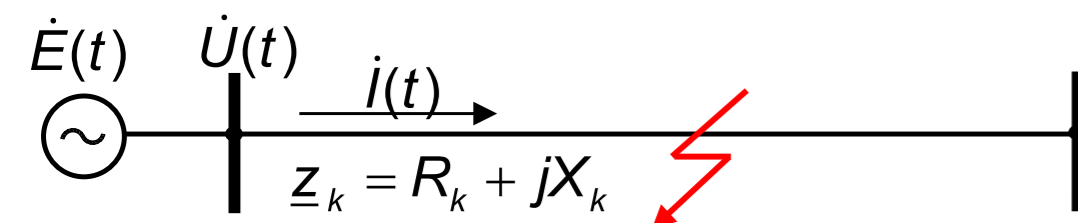
$$\lambda = \frac{\Delta \dot{U}(t) + z_{\text{л}} \dot{i}_2(t) + L_{\text{л}} \dot{i}'_2(t)}{z_{\text{л}} \dot{i}(t) + L_{\text{л}} \dot{i}'(t)}$$



\* Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. – М.: Энергоиздат, 2005.  
(используются составляющие прямой последовательности).

Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 2003.  
(используются составляющие нулевой и обратной последовательностей).

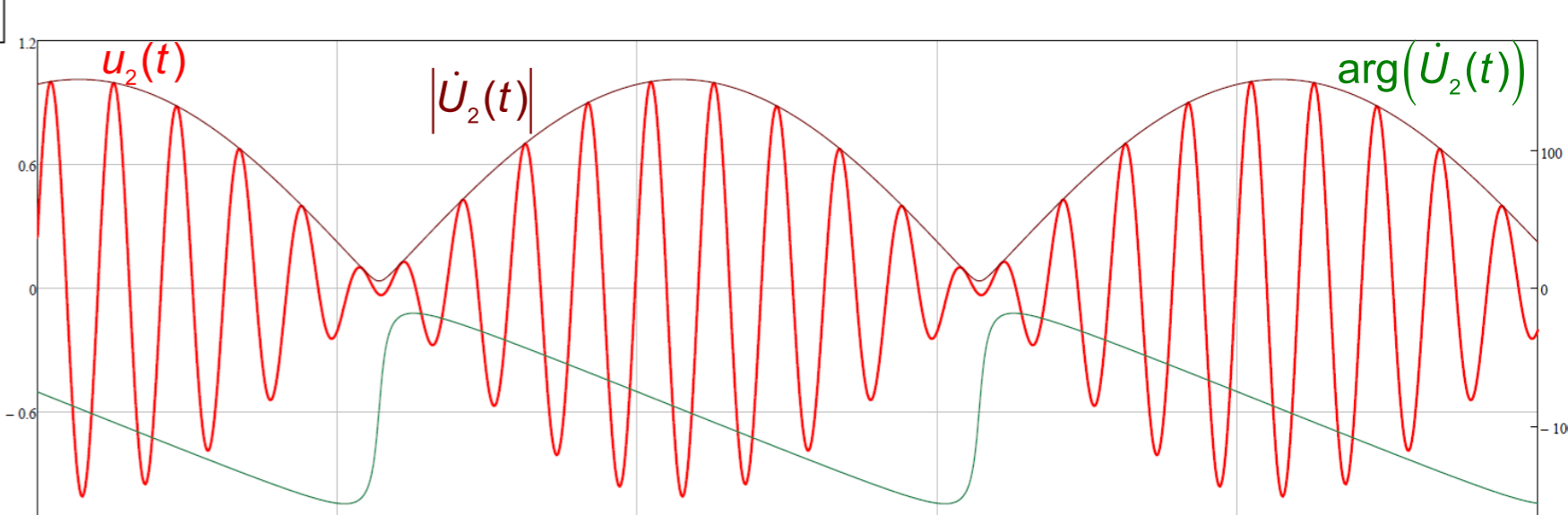
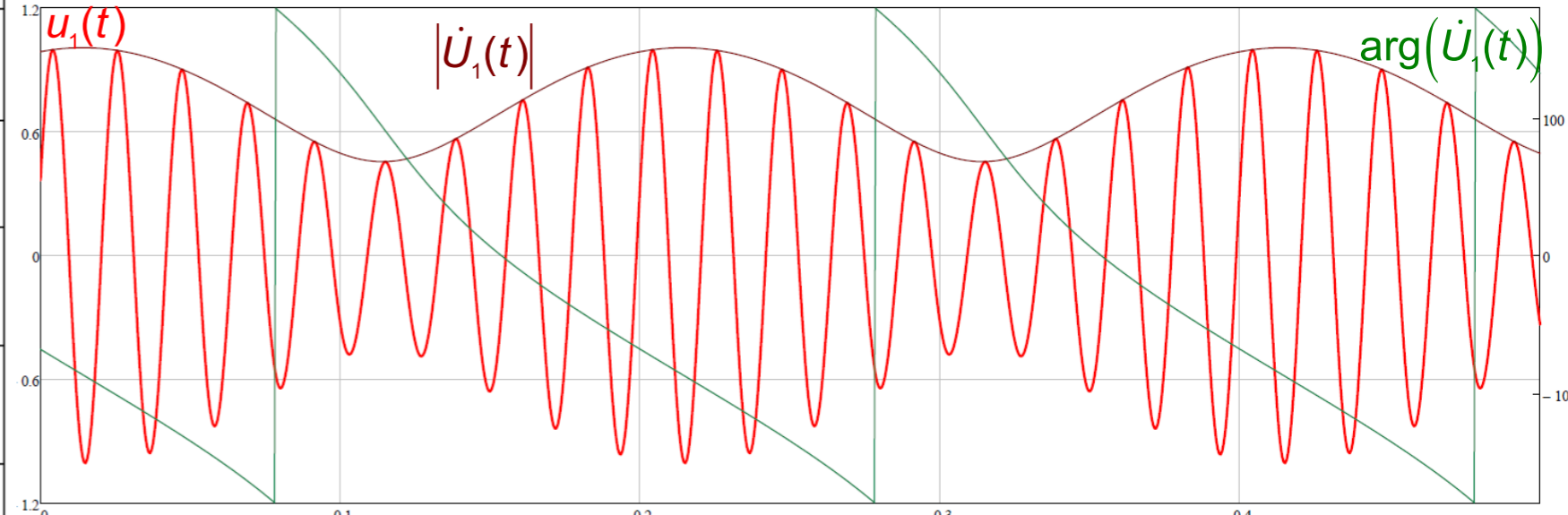
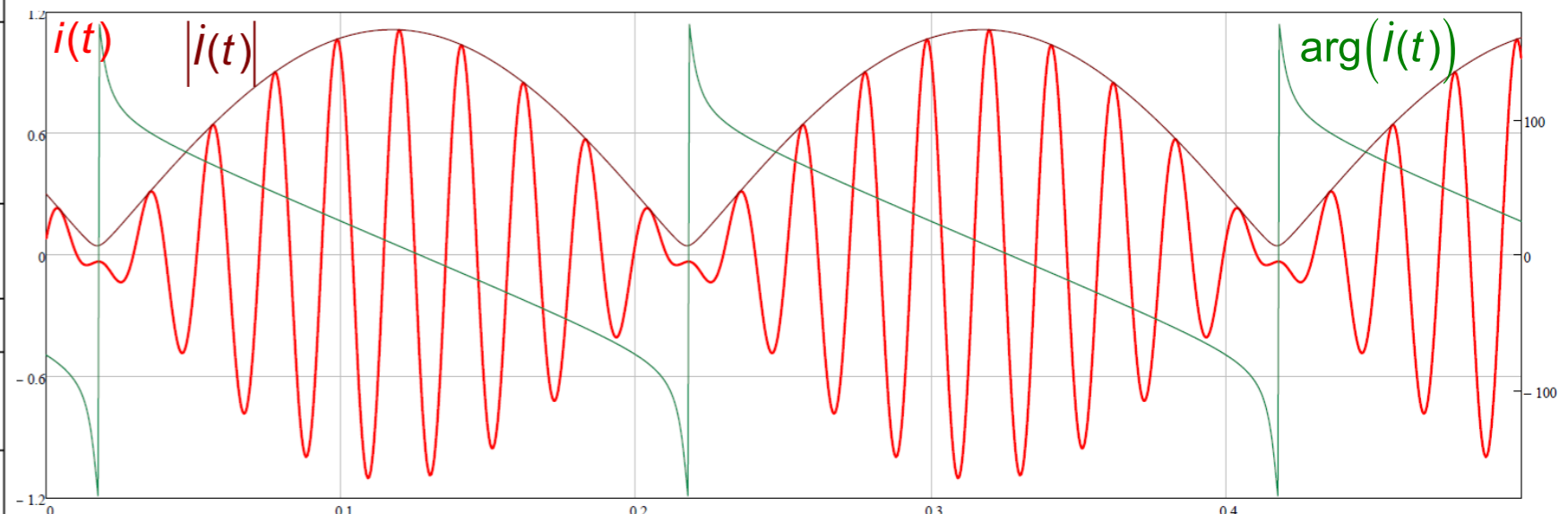




**Применение:** анализ синхровекторов электромеханических и электромагнитных переходных процессов, РЗА, дорасчет синхровекторов (реализация виртуального УСВИ), идентификация параметров сети, поиск источника НЧК, оценка состояния энергосистемы и т.д.

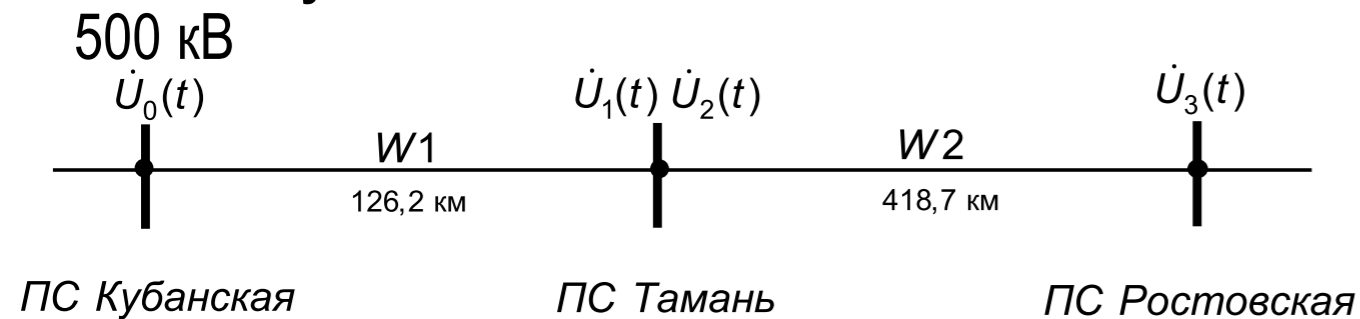
№	Метод	Выражения
1	Решение дифференциального уравнения	$\dot{i}(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \dot{E}(\tau) e^{p_1(t-\tau)} d\tau,$ <p>где <math>p_1 = \beta + j\omega_0</math>, <math>\beta = (R_c + R) / (L_c + L)</math>, <math>\omega_0 = 2\pi 50</math> рад/с,  <math>R_c, L_c</math> – параметры эквивалентной энергосистемы</p>
2	На основе интеграла свертки	$\dot{i}(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \dot{E}(t - \tau) e^{-p_1\tau} d\tau$
3	Операторный метод	$\dot{i}(p) = \frac{\dot{E}(p)}{z + Lp},$ для ряда случаев, например когда $\dot{E}(t) = \dot{E}$
4	Частотной-временной подход	$\dot{i}(t) = \int_0^t \dot{E}(\tau) dY(j\omega_0, t - \tau) = \dot{E}(t)Y_0(j\omega_0) + \int_0^t Y_1(j\omega_0, \tau) d\dot{E}(t - \tau) + \dot{E}(0)Y_1(j\omega_0, t)$ <p>где <math>g(t) \Leftrightarrow Y(p) = \frac{1}{R + pL}</math>, <math>Y(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau</math>, <math>Y(p, t) = Y_0(p) + Y_1(p, t)</math></p>
5	Упрощенный метод	$\dot{i}(t) \approx \dot{E}(t)Y(j\omega(t), t), \dot{i}_1(t) \approx \dot{E}(t)Y(j\omega(t)), \dot{i}_2(t) \approx \dot{E}(0)Y_1(j\omega(t), t)$ <p>где <math>\omega(t)</math> - мгновенная частота, рассчитываемая на основе <math>\dot{E}(t)</math></p>

№	Наименование	Выражение
1	Энергосистема	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>236 кВ  <math>\omega_1 = 2\pi 45</math> рад/с  <math>Z_{S1} = 1.2 + j12.8</math> Ом</p> </div> <div style="margin-right: 20px;"> </div> <div style="margin-right: 20px;"> <p>231 кВ  <math>\omega_0 = 2\pi 50</math> рад/с  <math>Z_{S0} = 0</math></p> </div> </div>
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	Подстановка 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 $\dot{I}(t)$	$\dot{I}_p(t) = \frac{\dot{E}}{z_{03}} e^{j\Delta\omega t} - \frac{\dot{E}_0}{z_{\Delta 03}}$ , где $z_{\Delta 03} = R_{03} + j(\omega + \Delta\omega)L_{03}$
8	Синхровектор напряжения $\dot{U}_1(t)$	$\dot{U}_{1p}(t) = \dot{E}_0(t) - z_{01} \dot{I}_p(t) - L_{01} \frac{d\dot{I}_p(t)}{dt} = \left(1 - \frac{z_{01}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{01}}{z_{\Delta 03}}\right) \dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{01}}{z_{\Delta 03}} \dot{E}_0$
9	Синхровектор напряжения $\dot{U}_2(t)$	$\dot{U}_{2p}(t) = \dot{U}_{1p}(t) - z_{12} \dot{I}_p(t) - L_{12} \frac{d\dot{I}_p(t)}{dt} = \left(1 - \frac{z_{02}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{02}}{z_{\Delta 03}}\right) \dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{02}}{z_{\Delta 03}} \dot{E}_0$
10	Разность синхровекторов напряжений	$\Delta \dot{U}_p(t) = \dot{U}_{1p}(t) - \dot{U}_{2p}(t) = \left(\frac{z_{12}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{12}}{z_{\Delta 03}}\right) \dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{12}}{z_{\Delta 03}} \dot{E}_0$

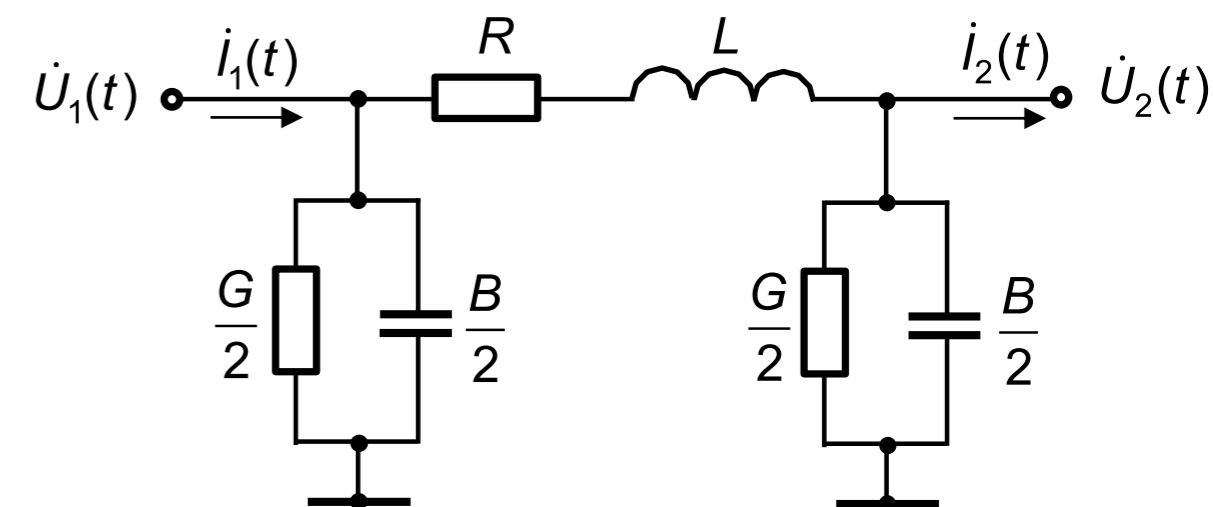


Применение первого метода анализа позволило определить аналитические зависимости для синхровекторов тока и напряжений при асинхронном режиме энергосистемы. Полученные зависимости могут использоваться для анализа поведения дистанционной защиты в асинхронных режимах работы энергосистем

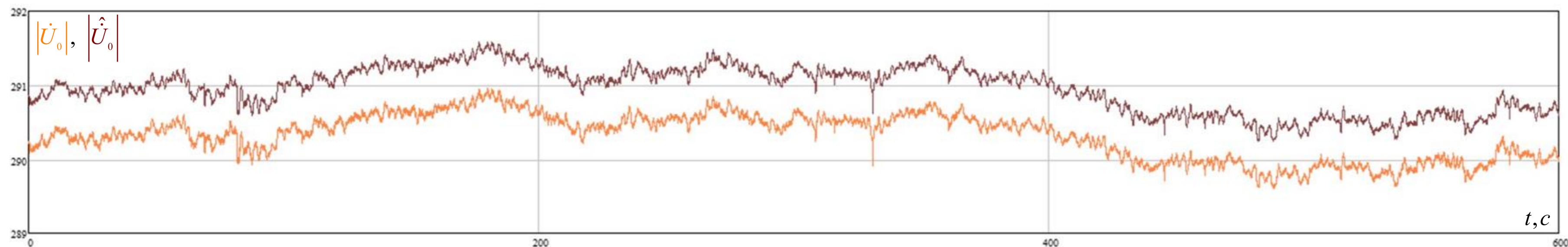
## Транзит ПС Кубанская – ПС Тамань – ПС Ростовская



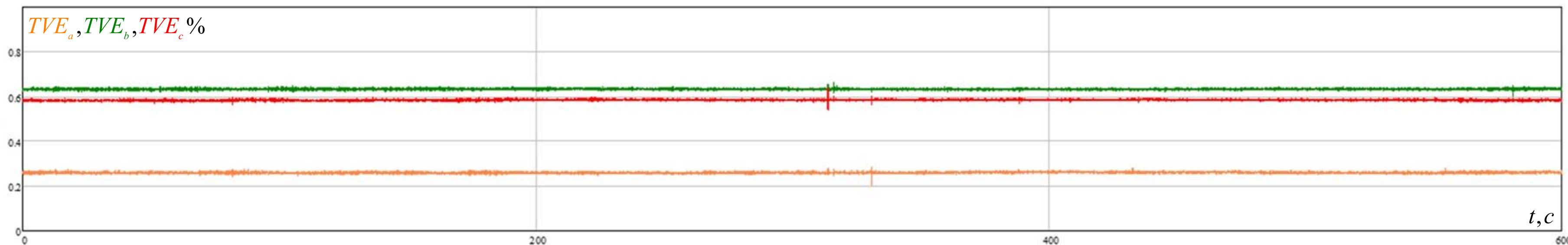
виртуальное УСВИ,  
верификация показаний УСВИ  
идентификация параметров  
линий



Расчет синхрофазора напряжения  $\dot{U}_0(t)$  на основе синхрофазоров  $\dot{U}_1(t)$ ,  $\dot{I}_1(t)$  и заданных параметров линии W1.



Полная погрешность не превышает 0,7%





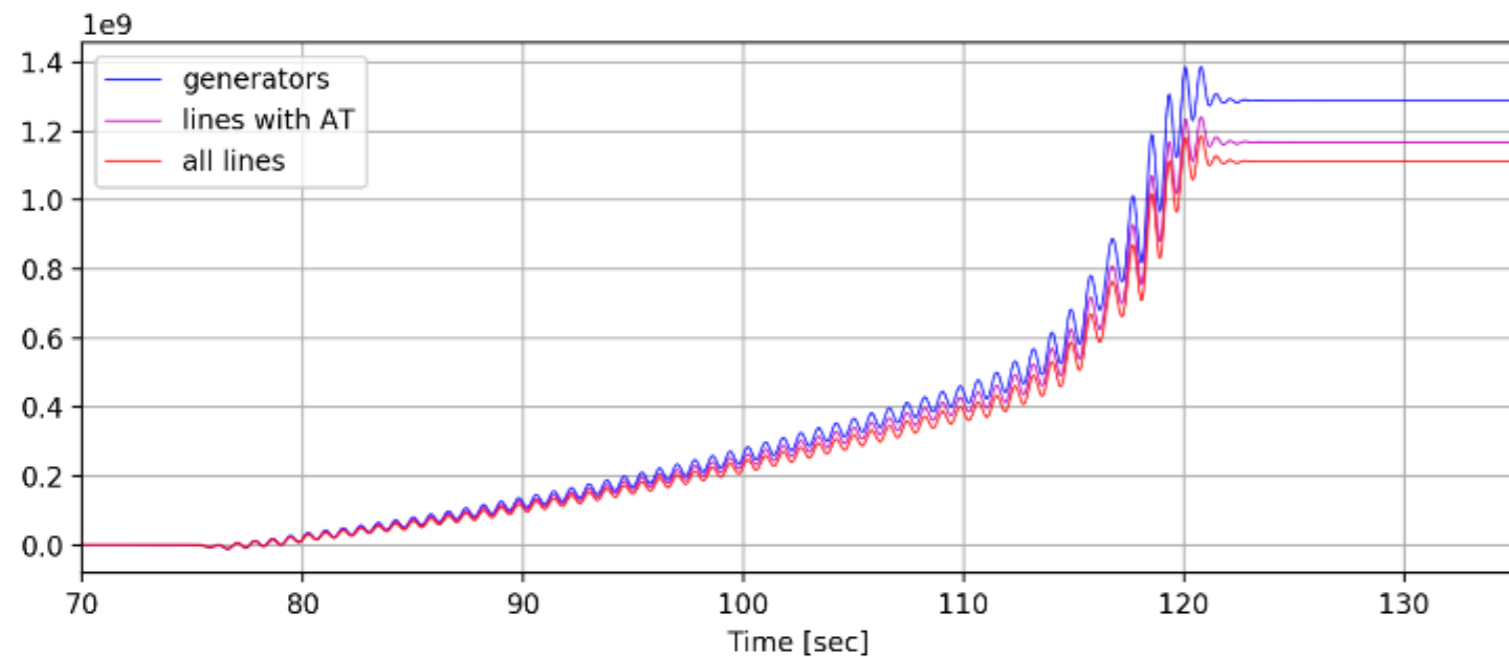
№	Метод	Выражения
1	Решение дифференциального уравнения	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \dot{E}(\tau) e^{p_1(t-\tau)} d\tau,$ где $p_1 = \beta + j\omega_0$ , $\beta = (R_c + R) / (L_c + L)$ , $\omega_0 = 2\pi 50$ рад/с, $R_c, L_c$ – параметры эквивалентной энергосистемы
2	На основе интеграла свертки	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \dot{E}(t - \tau) e^{-p_1 \tau} d\tau$
3	Частотной-временной подход	$i(t) = \int_0^t \dot{E}(\tau) dY(j\omega_0, t - \tau) = \dot{E}(t) Y_0(j\omega_0) + \int_0^t Y_1(j\omega_0, \tau) d\dot{E}(t - \tau) + \dot{E}(0) Y_1(j\omega_0, t)$ 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	$i(t) \approx \dot{E}(t) Y(j\omega(t), t), \quad i_1(t) \approx \dot{E}(t) Y(j\omega(t)), \quad i_2(t) \approx \dot{E}(0) Y_1(j\omega(t), t)$ где $\omega(t)$ - мгновенная частота, рассчитываемая на основе $\dot{E}(t)$



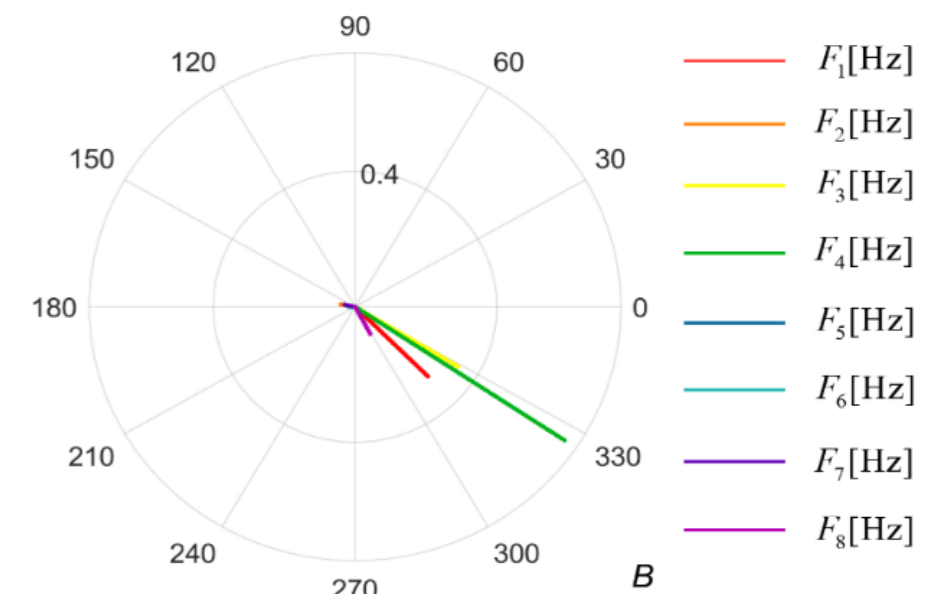
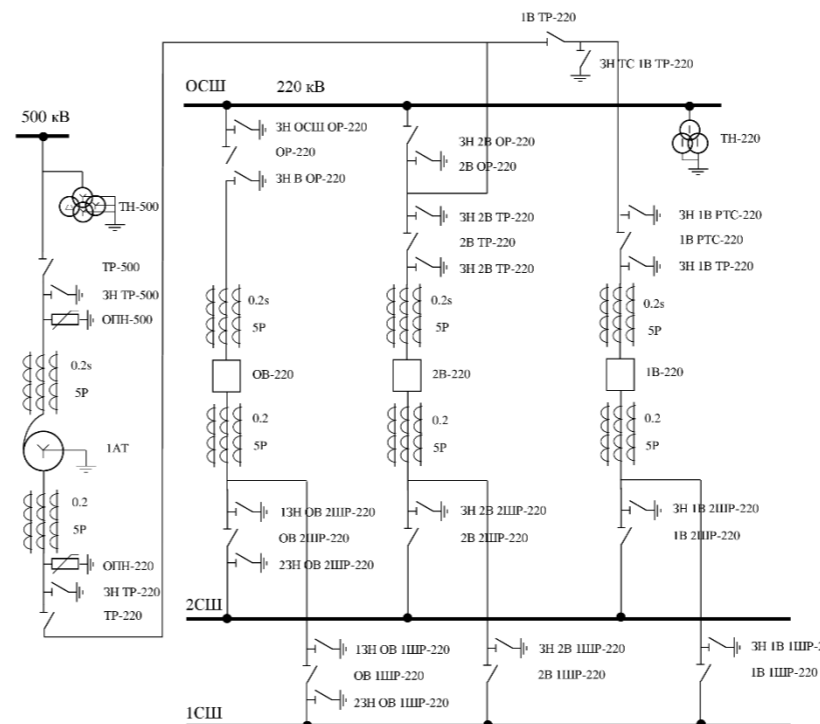
№	Метод	Выражения
1	Решение разностного уравнения	$i(n) = \frac{T}{L} \sum_{m=0}^n \Delta \dot{U}(n) e^{p_1(n-m)T}$
2	На основе свертки	$i(n) = \frac{T}{L} \sum_{m=0}^n \Delta \dot{U}(n - m) e^{-p_1 m T}$
3	Частотной-временной подход	$i(n) = \Delta \dot{U}(n) Y_0(j\omega_0) + T \sum_{m=0}^n Y_1(j\omega_0, m) \Delta \dot{U}'(n - m) + \Delta \dot{U}(0) Y_1(j\omega_0, n)$
4	Упрощенный метод	$i(n) \approx \Delta \dot{U}(n) Y(j\omega(n), nT), \quad i_1(n) \approx \Delta \dot{U}(n) Y(j\omega(n)), \quad i_2(t) \approx \Delta \dot{U}(0) Y_1(j\omega(n), nT)$

Мокеев, А.В. Методы анализа функционирования УСВИ при электромагнитных и электромеханических переходных процессах // Сб. межд. научно-техн.конф. "Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем". – Сочи, 2015.

## Поиск источника НЧК



## The Dissipating Energy Flow (DEF) method



## Mode shape estimation (MSE)



В 2022 завершилась НИР «Разработка алгоритмов и способов мониторинга состояния силовых трансформаторов в распределительных электрических сетях 35-110 кВ на основе синхронизированных векторных измерений».

Исполнители: АО «Федеральный испытательный центр», ООО «Инженерный центр «Энергосервис»;  
ФБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

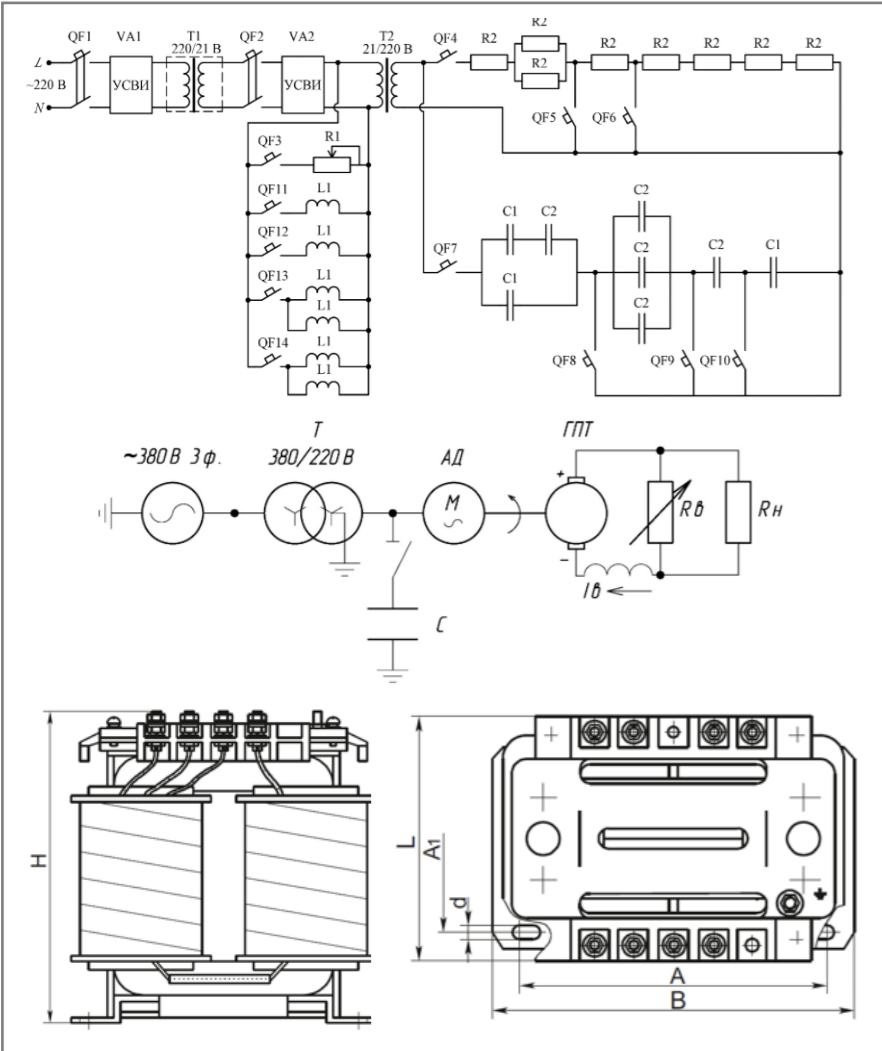
Механизм повреждения	Виды дефектов	Диагностический параметр
Электромагнитные силы, вызванные током КЗ	Деформация обмотки	Изменение индуктивного сопротивления продольной ветви
Повреждение изоляции, образующее контур, сцепленный с основным магнитным потоком	Межвитковое замыкание: а) полное замыкание двух 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

## СМСТ на базе СВИ

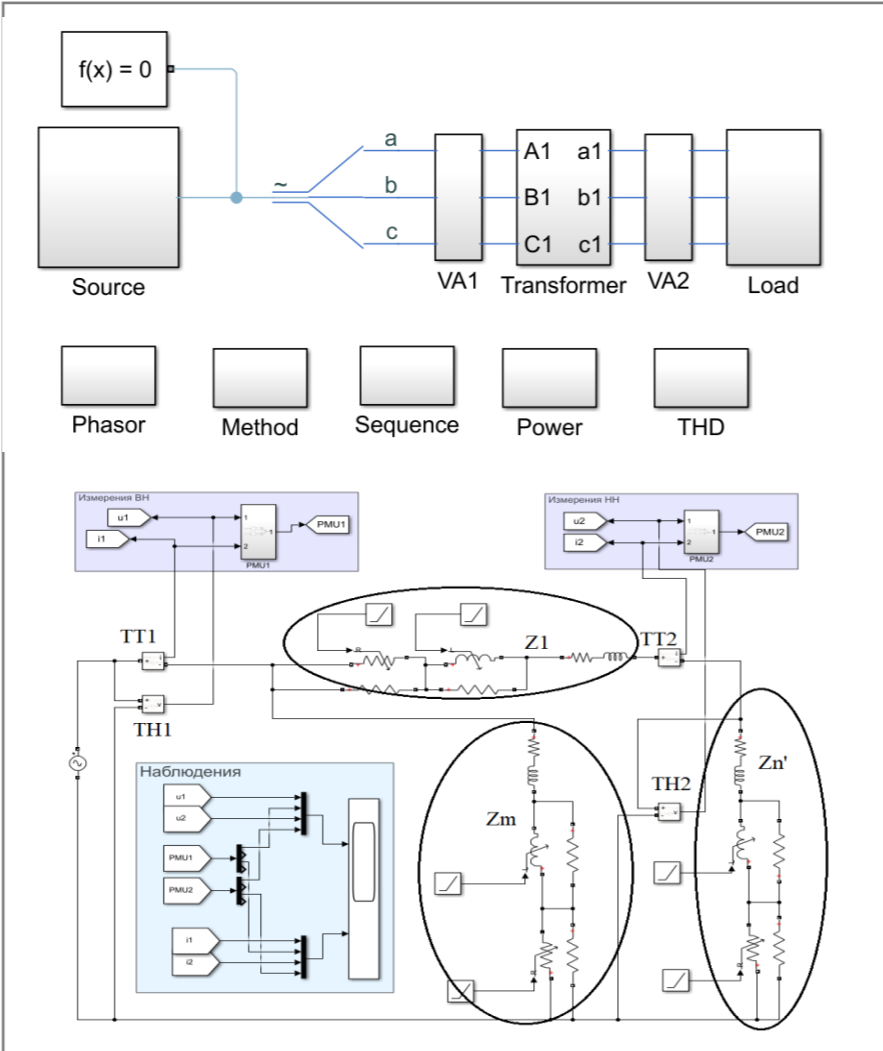
### моделирование

### промышленная эксплуатация

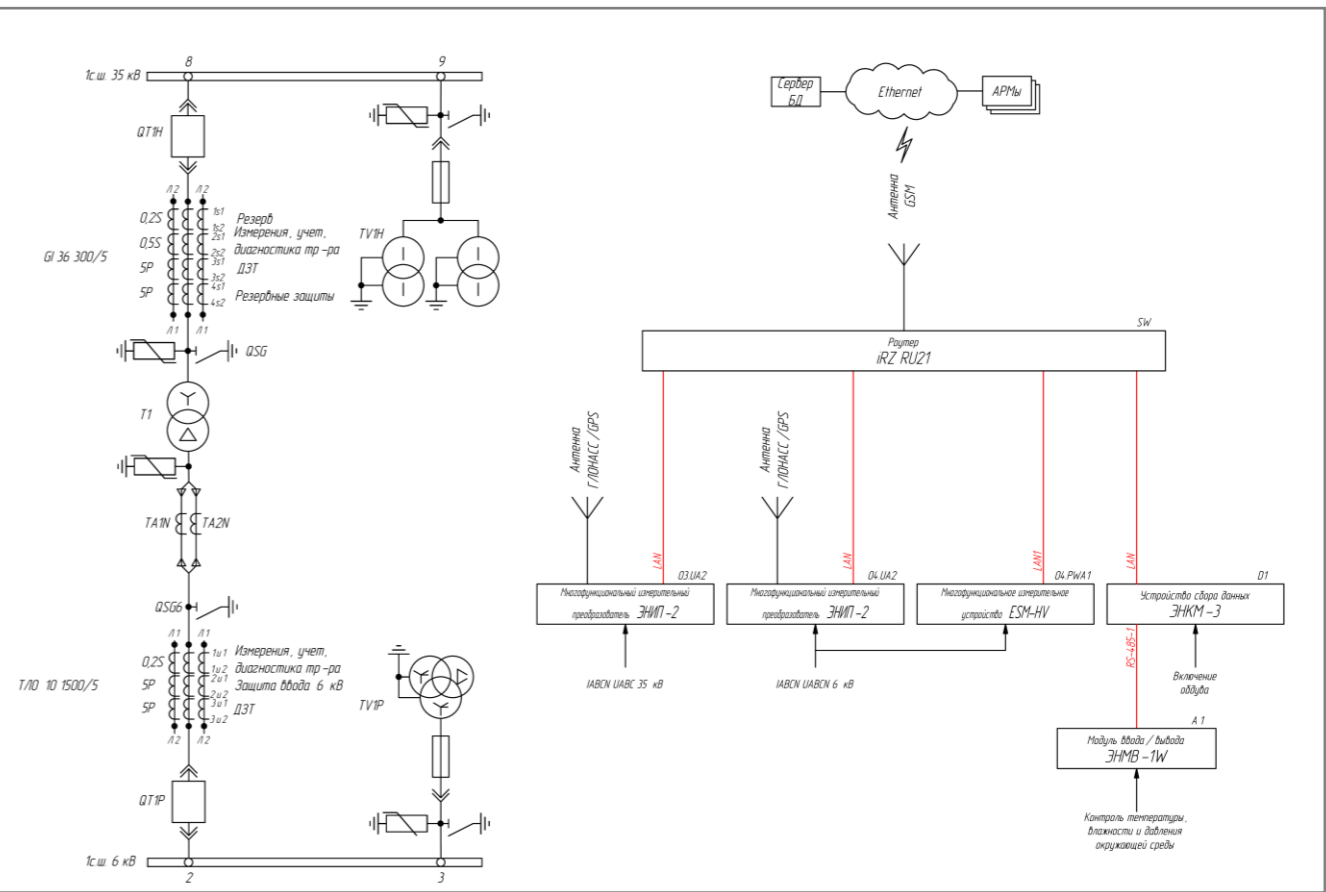
#### физическое на лабораторном стенде

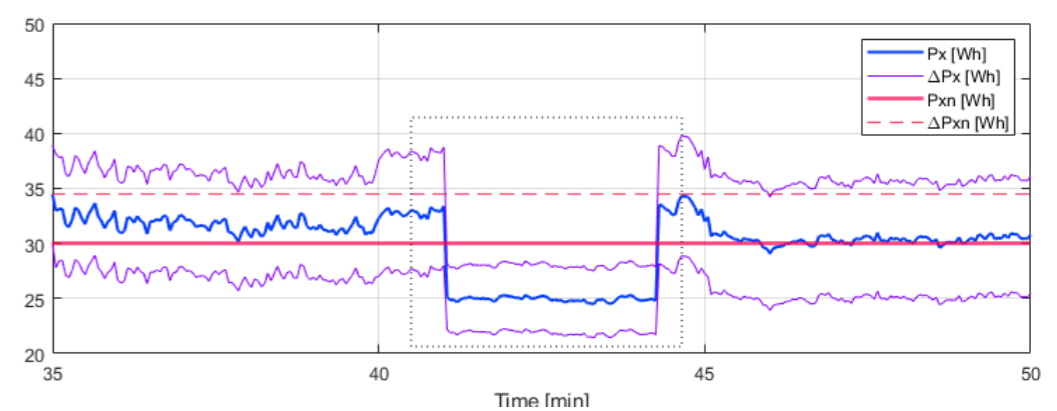
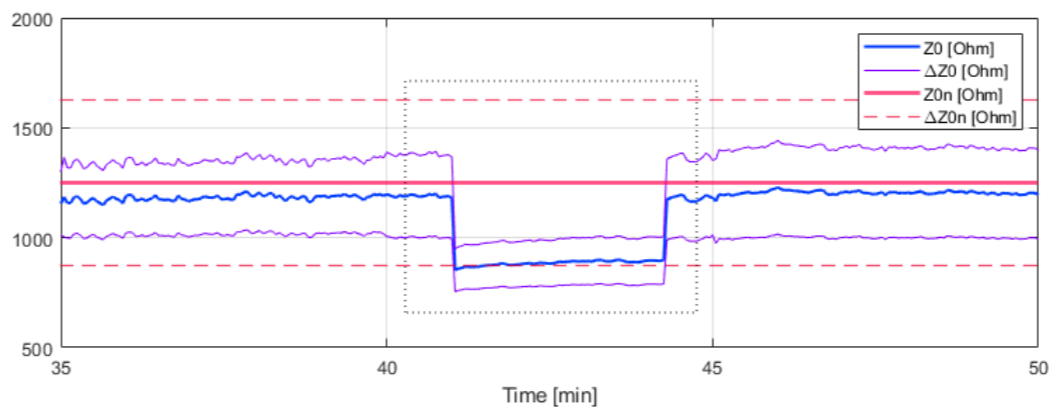
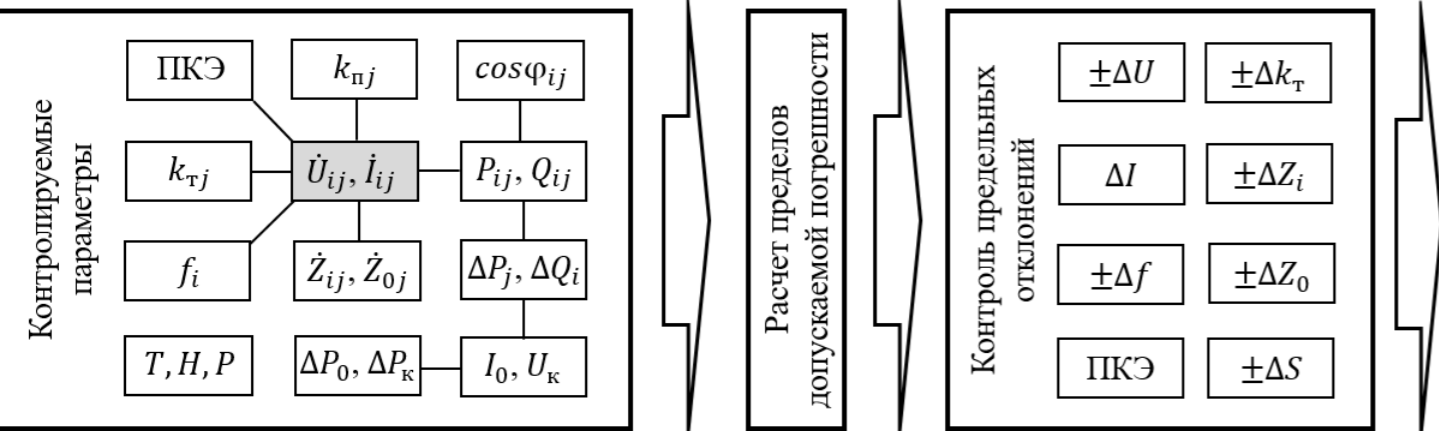


#### математическое в среде MATLAB/Simulink

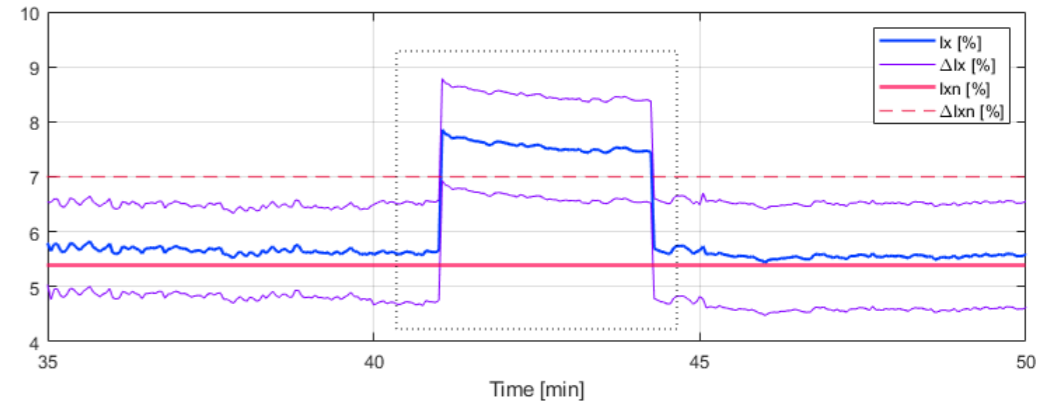


#### СМСТ на базе СВИ установлена на двух подстанциях ПАО «МРСК Северо-Запада»





Параметр	Область пересечения $\cap X, \%$			Отклонение $\delta X, \%$			Градиент $ grad(X) $			Уровень
	До	ВЗ	После	До	ВЗ	После	До	ВЗ	После	
$k_{т}$	100,0	100,0	100,0	-0,199	-0,331	-0,201	0,000	0,014	0,000	2
$u_{x\%}$	80,0	61,7	73,3	9,706	11,898	10,653	0,049	0,237	0,039	2
$P_{к}$	88,4	91,8	87,0	17,301	17,031	18,686	0,438	0,853	0,411	1
$P$	100,0	0,0	100,0	9,526	-16,888	11,254	0,468	8,560	4,228	3
$P$	82,1	100,0	89,7	14,191	3,463	15,713	0,795	9,279	1,622	2
$I_{x\%}$	69,5	24,4	73,8	4,512	40,42	5,326	0,040	2,111	0,101	2
$Z_{12}$	47,6	35,4	57,8	8,630	10,952	9,499	0,032	0,164	0,025	2
$Z_0$	100,0	63,8	100,0	-4,962	-29,257	-5,685	11,981	320,731	22,595	2



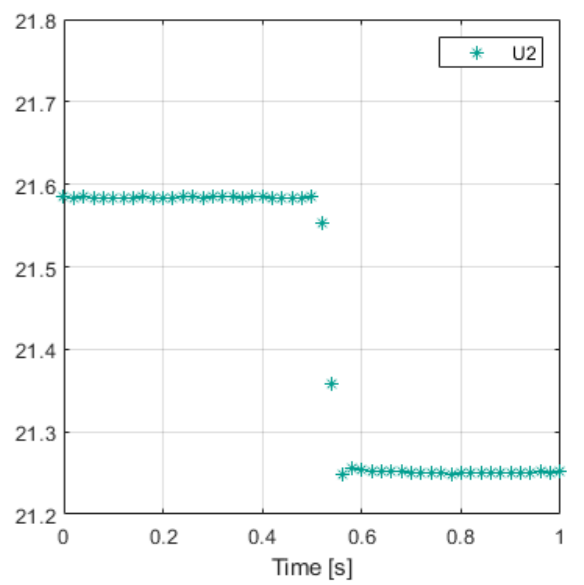
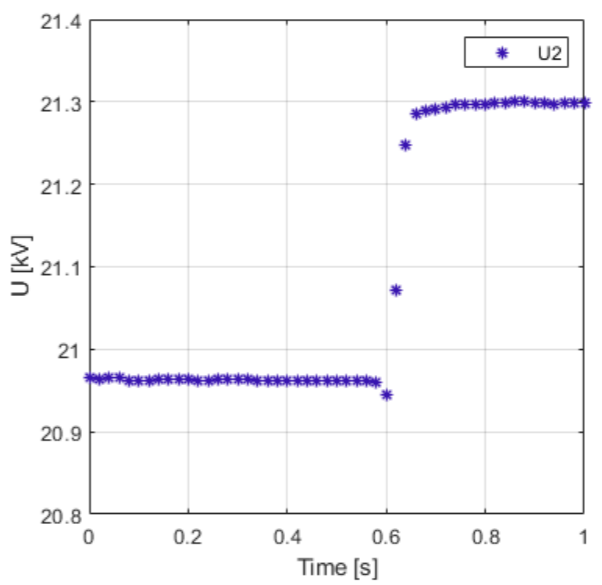
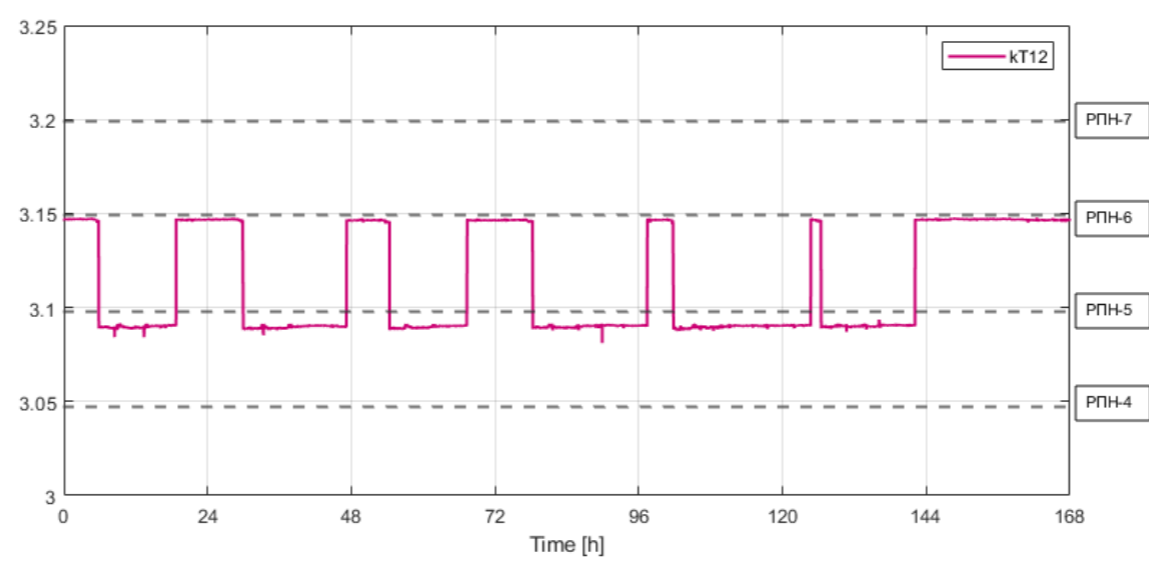
## Контроль состояния РПН

Для двухобмоточного трансформатора

$$k_{т} = \left| \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} \right| = \left| \frac{-\dot{U}_1 + \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_2 + \dot{Z}_2 \dot{I}_2} \right|$$

Для трехобмоточного трансформатора:

$$k_{т12} = \left| \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} \right| = \left| \frac{-\dot{U}_1 + \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_2 + \dot{Z}_2 \dot{I}_2} \right|, \quad k_{т13} = \left| \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_3} \right| = \left| \frac{-\dot{U}_1 + \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_3 + \dot{Z}_3 \dot{I}_3} \right|, \quad k_{т23} = \left| \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_3} \right| = \left| \frac{\dot{U}_2 + \dot{Z}_2 \dot{I}_2}{\dot{U}_3 + \dot{Z}_3 \dot{I}_3} \right|$$



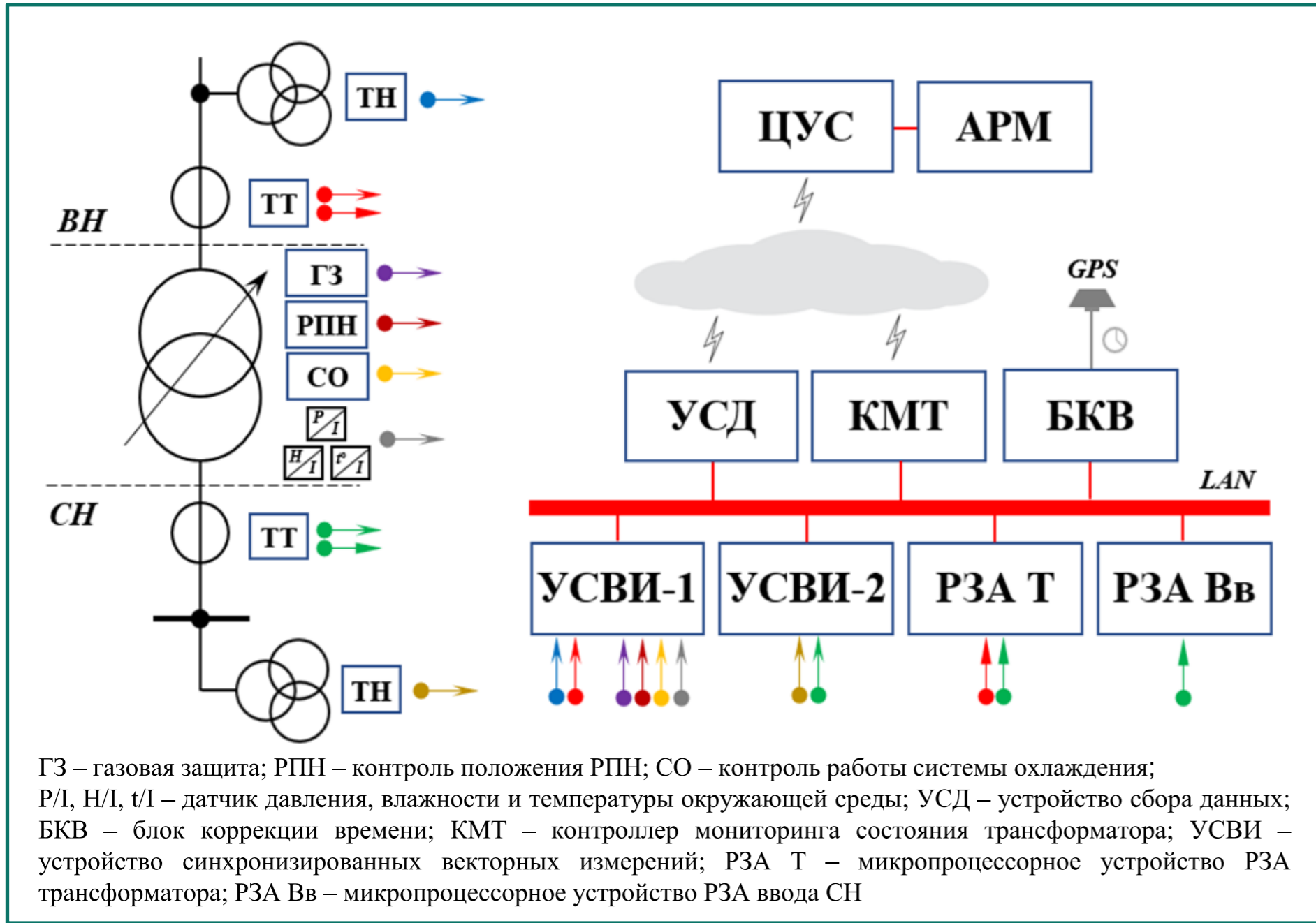




\*с учетом номинальной мощности установленных силовых трансформаторов



# СТРУКТУРА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТРАНСФОРМАТОРА



## 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



УСВИ с КВД, МИП ТМ  
счетчик, прибор ПКЭ



МИП ТМ,  
контроль сквозных токов,  
БНТ



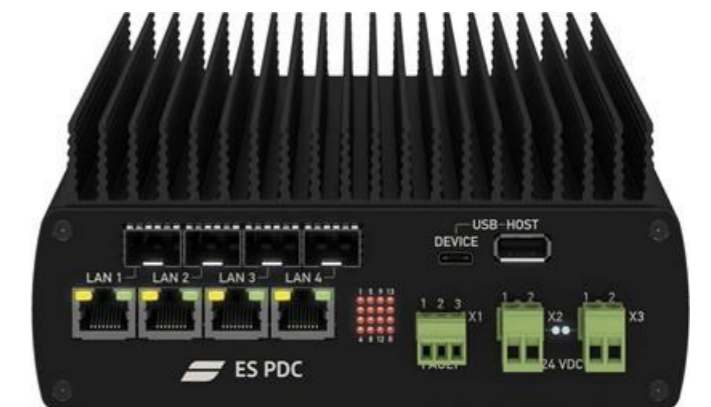
РПН,охлаждение,  
окр.среда



УСД,  
БКВ



КМТ



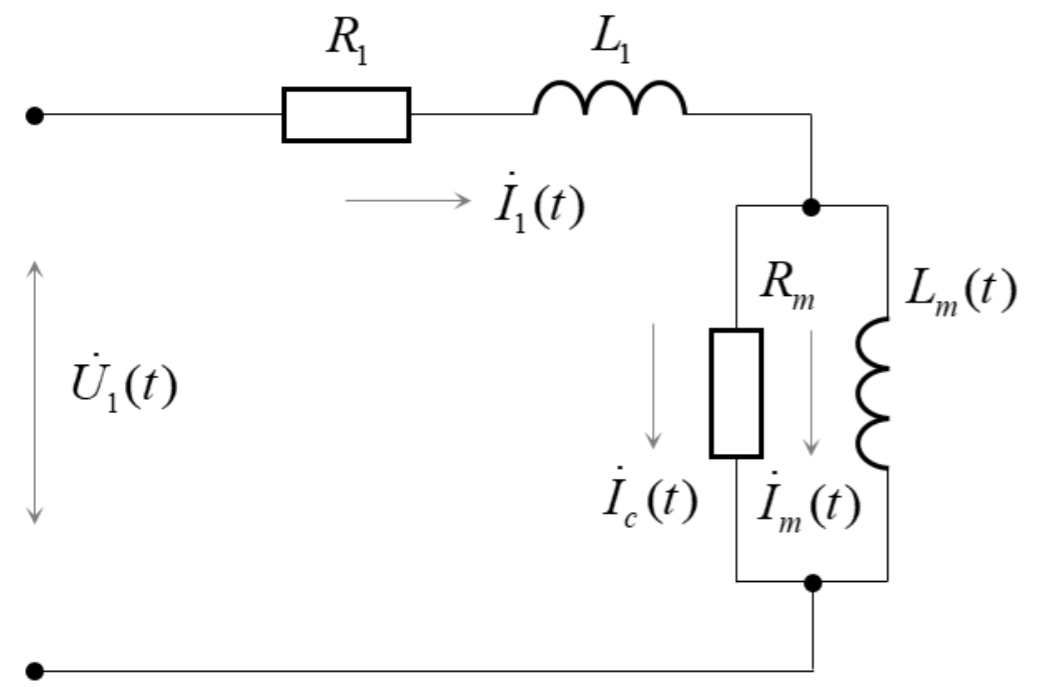
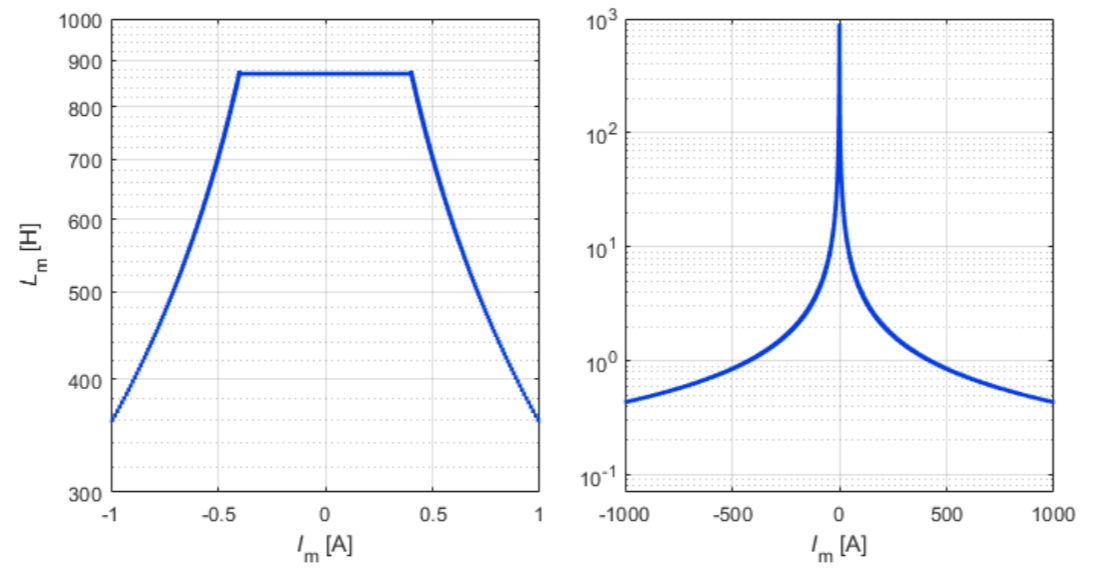
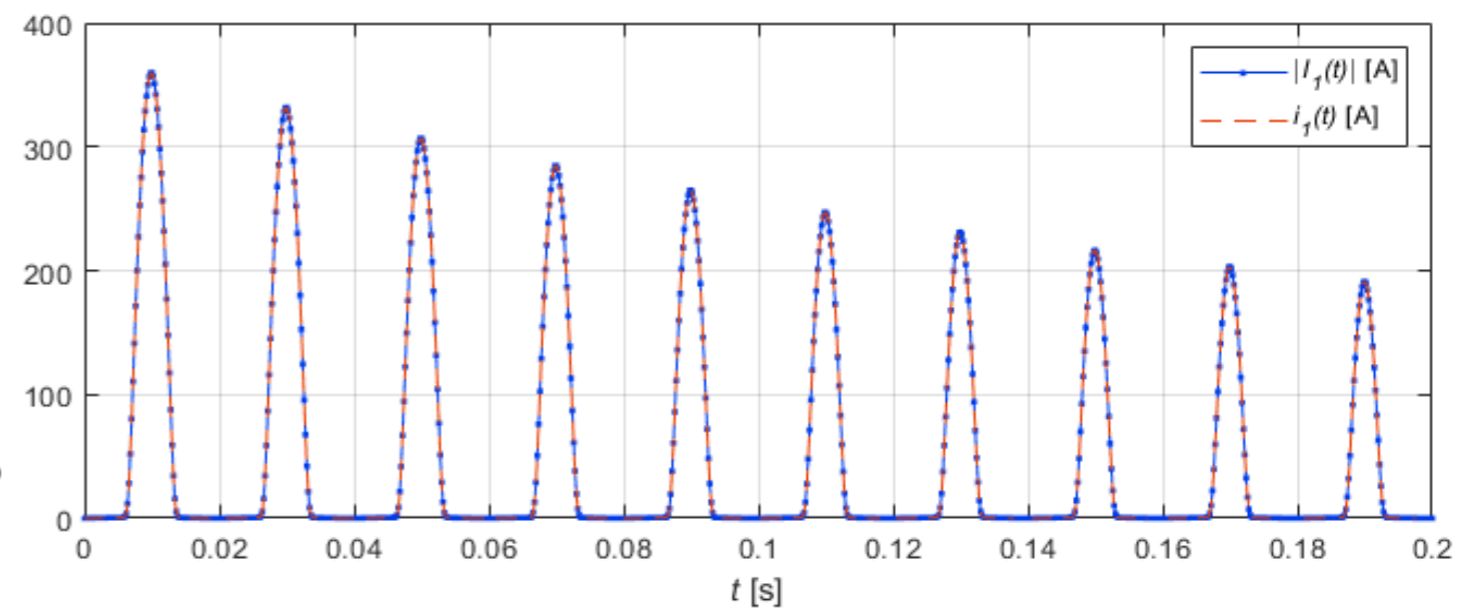


Схема замещения СТ при БНТ



Изменение индуктивности ветви намагничивания при БНТ

## Распознавание режима БНТ

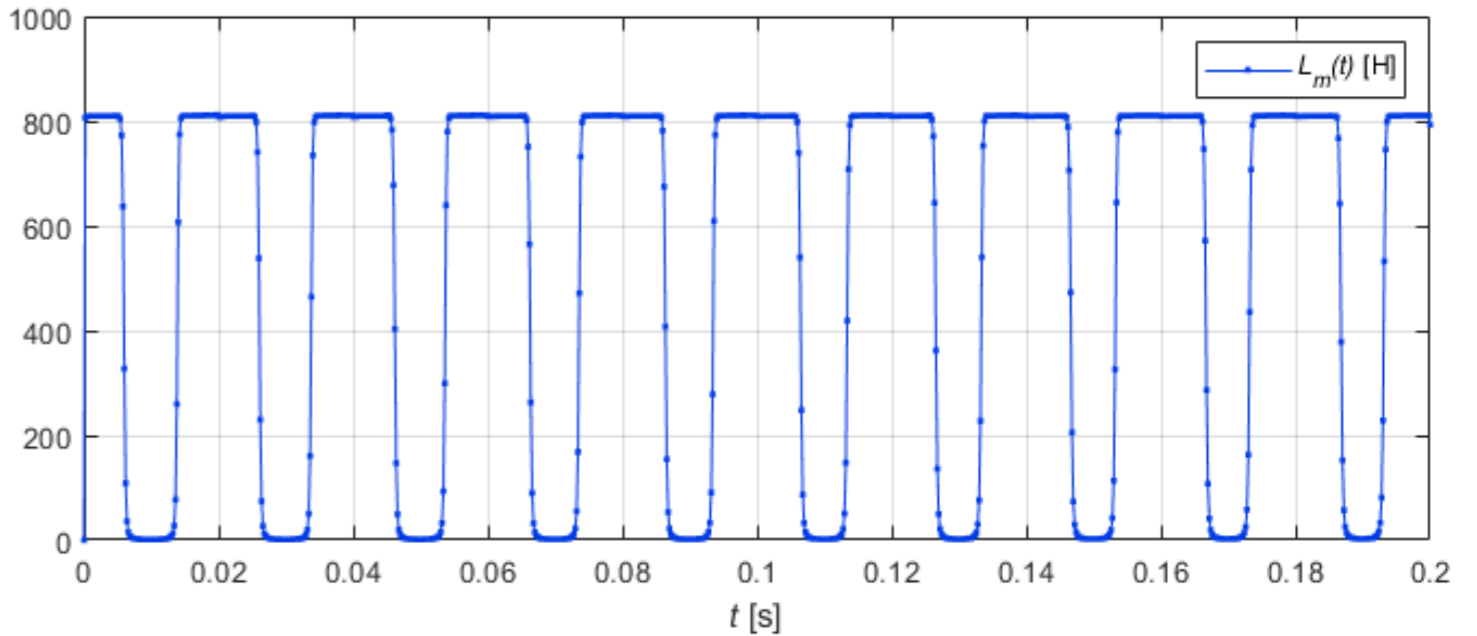


$\lambda = Li$ , Связь между магнитным потоком, индуктивностью и током цепи

$i_m = a_1 \lambda_m + b_1 \lambda_m^c$ , Аппроксимация кривой намагничивания трансформатора

$$\begin{cases} \dot{\lambda}'_1(t) = \dot{U}_1(t) - \frac{\dot{\lambda}_1(t)}{L_1} (R_1 + R_m) + R_m \left( a_1 \dot{\lambda}_m(t) + b_1 \left( \text{Re}[\dot{\lambda}_m(t) e^{j\omega_0 t}]^c + j \text{Im}[\dot{\lambda}_m(t) e^{j\omega_0 t}]^c \right) / e^{j\omega_0 t} \right) - j\omega_0 \dot{\lambda}_1(t), \\ \dot{\lambda}'_m(t) = R_m \left( \frac{\dot{\lambda}_1(t)}{L_1} - a_1 \dot{\lambda}_m(t) - b_1 \left( \text{Re}[\dot{\lambda}_m(t) e^{j\omega_0 t}]^c + j \text{Im}[\dot{\lambda}_m(t) e^{j\omega_0 t}]^c \right) / e^{j\omega_0 t} \right) - j\omega_0 \dot{\lambda}_m(t). \end{cases}$$

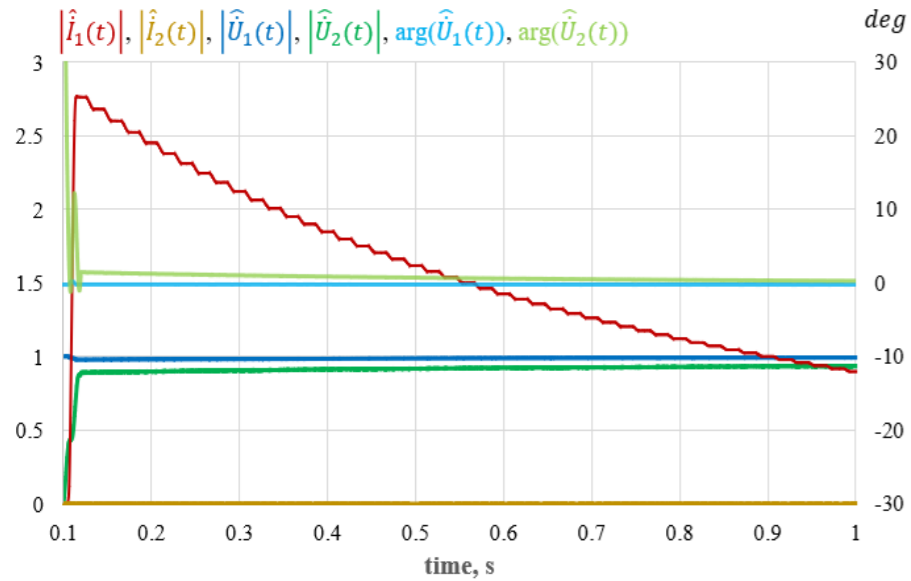
$\dot{I}_c(t) = \frac{\dot{\lambda}'_m(t)}{R_m}$ ,  $\dot{I}_m(t) = \dot{I}_1(t) - \dot{I}_c(t)$ ,  $L_m(t) = \text{Re} \left[ \frac{\dot{\lambda}_m(t)}{\dot{I}_m(t)} \right]$ . Расчет индуктивности намагничивания через синхровекторы процесса



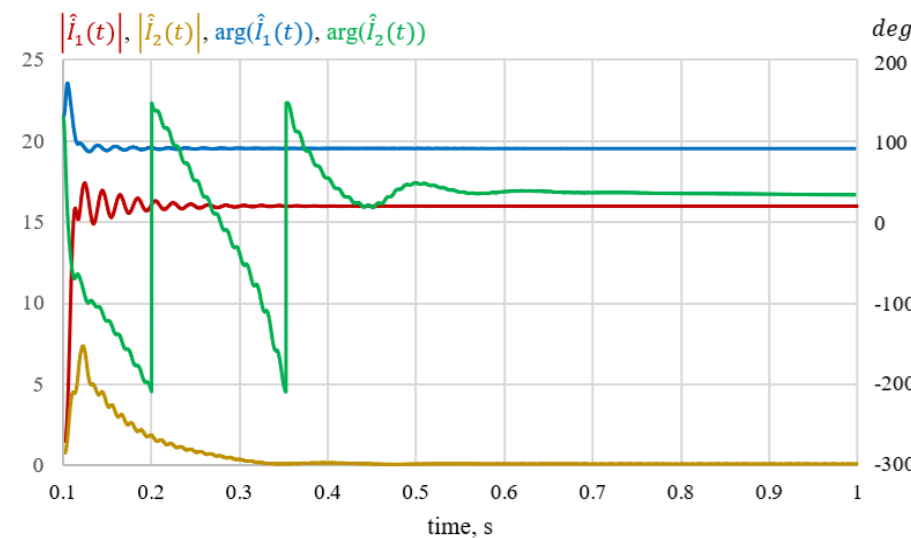
Расчетные значения индуктивности ветви намагничивания

$$\dot{U}_m(t) = \dot{U}_1(t) - z_1 \dot{I}_1(t) - L_1 \dot{I}'_1(t), \quad L_m(t) \approx \frac{\dot{U}_m(t)}{\dot{I}'_1(t) + j\omega_0 \dot{I}_1(t)}$$

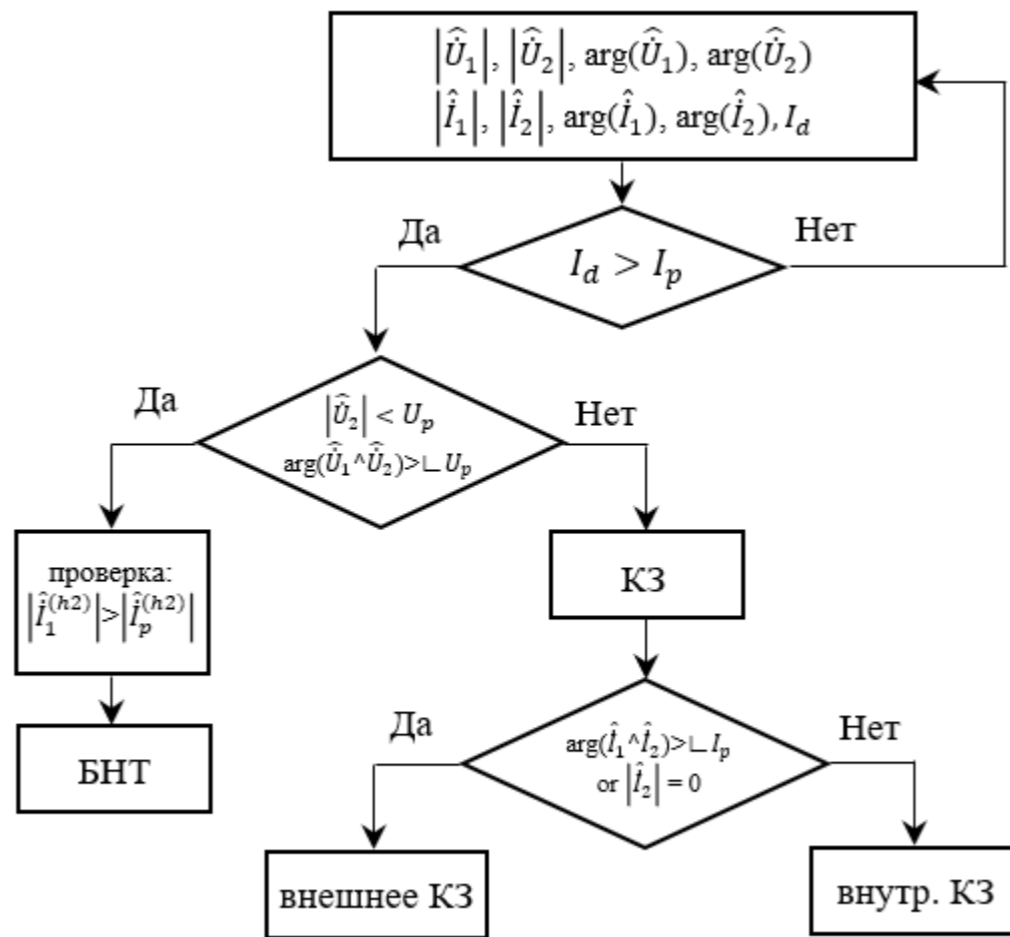
## Включение СТ на холостой ход



## Режим внутреннего КЗ

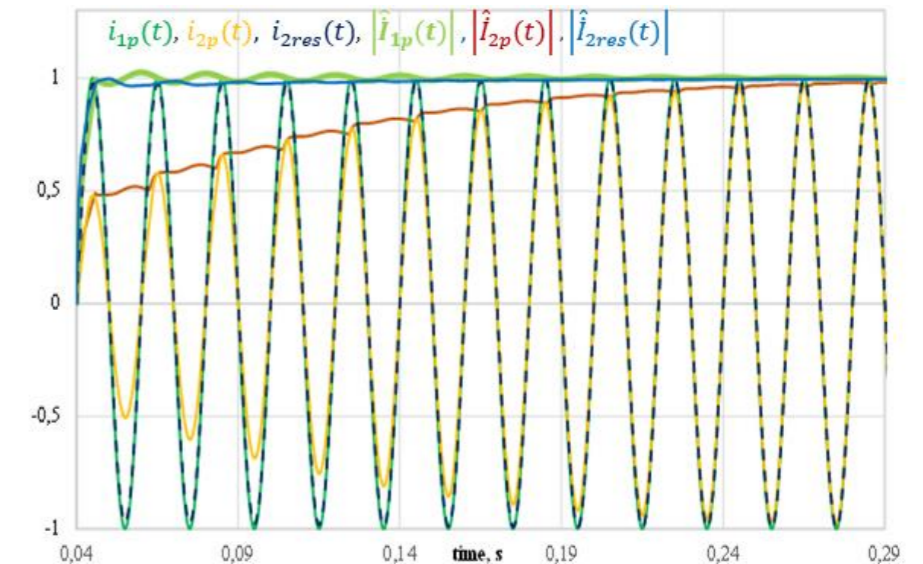
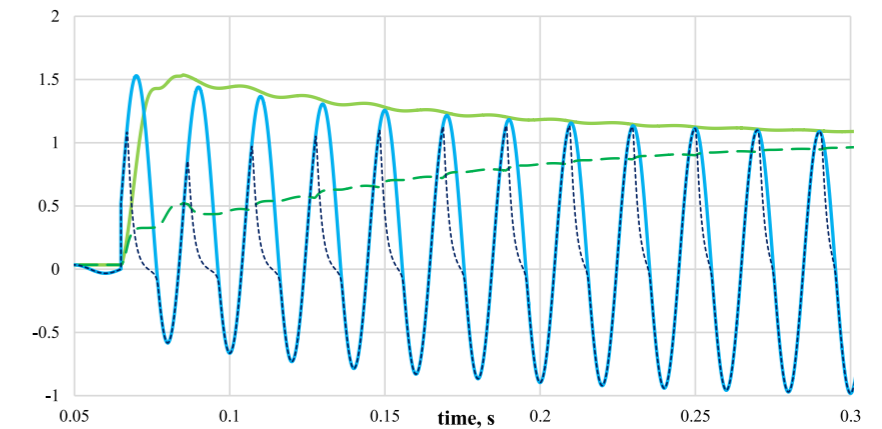


## Алгоритм на базе СВИ



$|\hat{U}_1|, |\hat{U}_2|$  - модули синхровекторов напряжения ВН и НН  
 $\arg(\hat{U}_1), \arg(\hat{U}_2)$  - аргументы синхровекторов напряжения ВН и НН  
 $|\hat{I}_1|, |\hat{I}_2|$  - модули синхровекторов тока ВН и НН  
 $\arg(\hat{I}_1), \arg(\hat{I}_2)$  - аргументы синхровекторов тока ВН и НН  
 $I_d$  - дифференциальный ток  
 $I_p, U_p, \perp U_p, \hat{I}_p^{(h2)}$  - расчетные уставки  
 $\hat{I}_1^{(h2)}$  - синхровектор тока 2-ой гармоники

## Восстановление вторичного тока ТТ при насыщении его сердечника



дифференциальная защита трансформатора

дополнительные критерии распознавания режимов БНТ, внешнего и внутреннего КЗ

алгоритм восстановления вторичного тока ТТ при насыщении его сердечника

мониторинг состояния трансформатора



# ПРИНЦИПЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОЗЗ НА ОСНОВЕ СВИ

## Алгоритм локализации

Измерение синхровекторов тока НП на участках сети  
Измерение синхровекторов напряжения НП на секциях ЦП

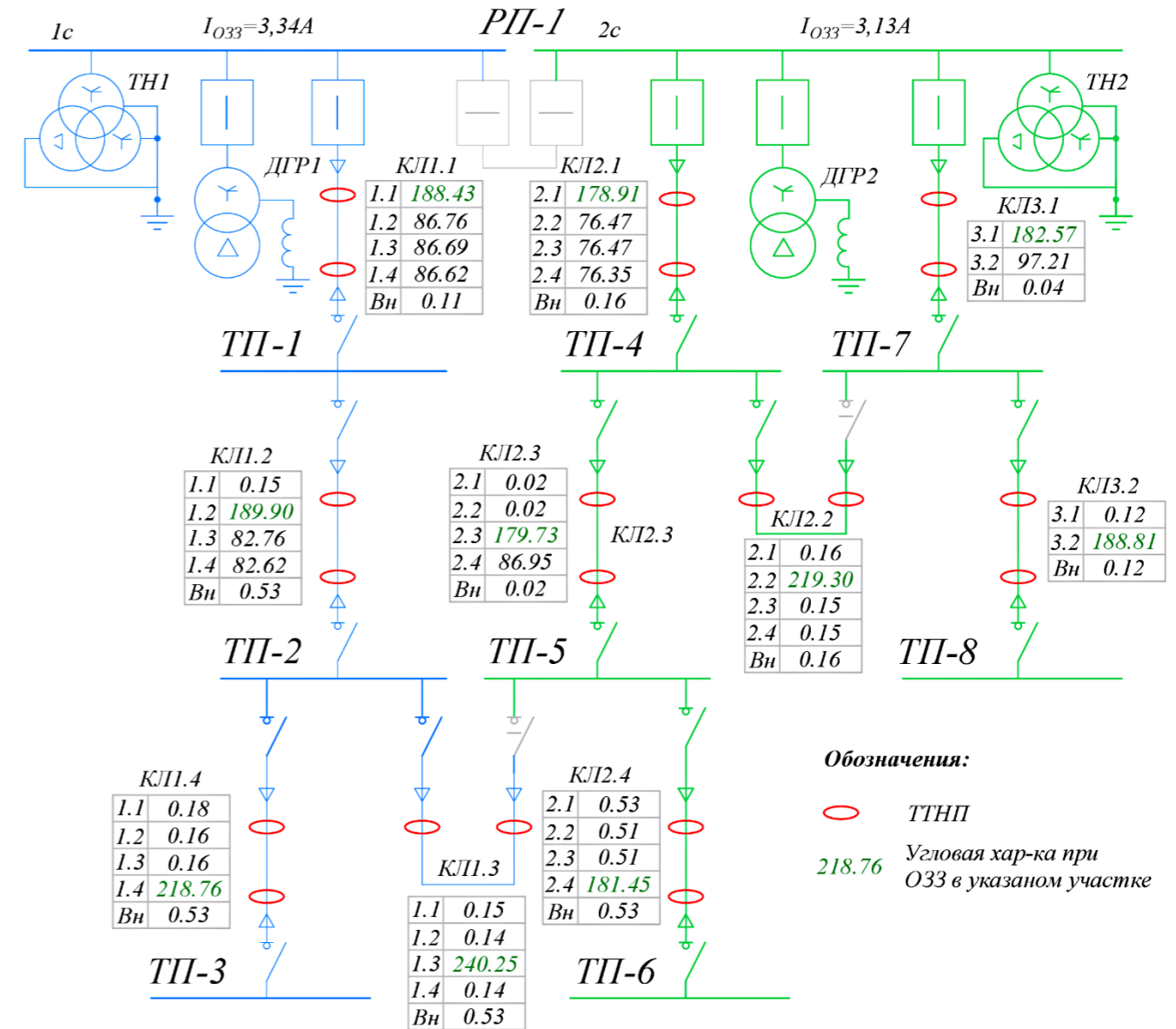
Расчет фазового сдвига между синхровекторами токов НП в начале и конце участков:  $\Delta\varphi_n = \varphi_n^H - \varphi_n^K$

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  $\psi_{\Delta n}$

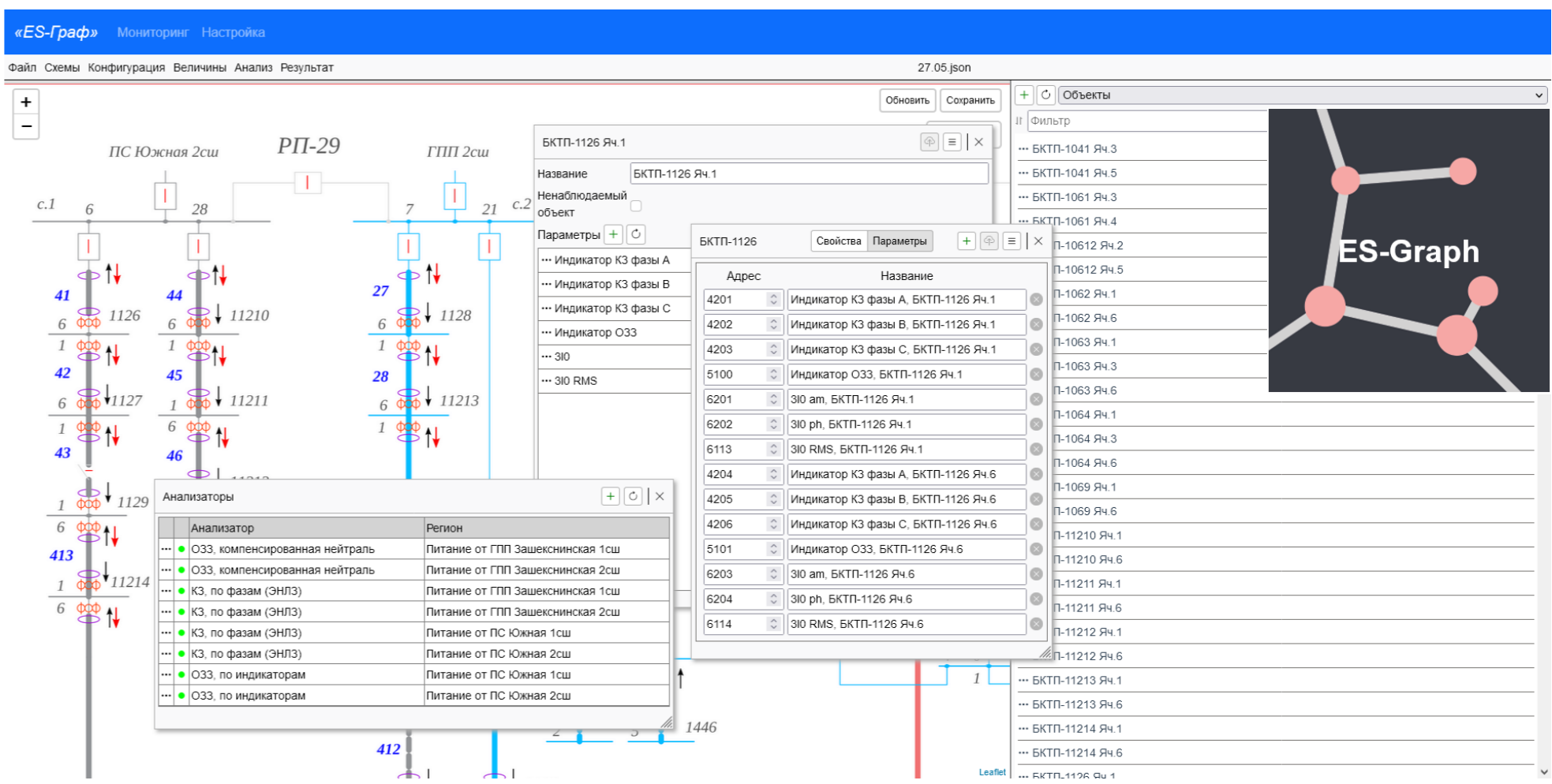
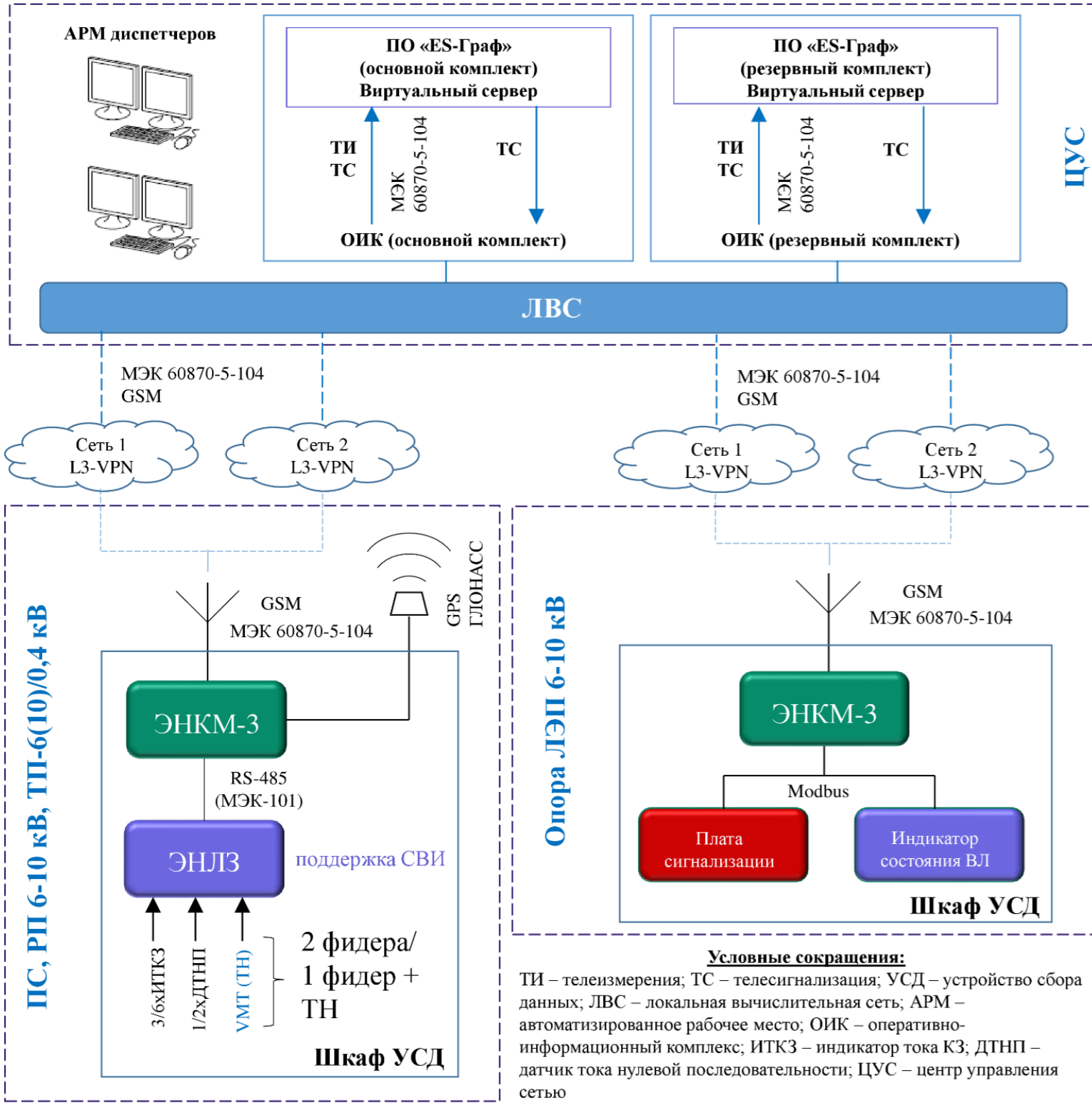
**Варианты реализации алгоритма:** по синхровекторам тока и напряжения НП основной частоты в установившемся режиме ОЗЗ, по синхровекторам высших гармоник тока НП, по синхровекторам тока НП основной частоты в переходном процессе ОЗЗ



Точка ОЗЗ	Участок сети									
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2
1.1	188,4	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-	-	-
1.2	86,8	189,9	0,1	0,2	-	-	-	-	-	-
1.3	86,7	82,8	240,3	0,2	-	-	-	-	-	-
1.4	86,6	82,6	0,1	218,7	-	-	-	-	-	-
2.1	-	-	-	-	178,9	0,2	0,0	0,53	0,0	0,1
2.2	-	-	-	-	76,5	219,3	0,0	0,51	0,0	0,1
2.3	-	-	-	-	76,5	0,1	179,7	0,51	0,0	0,1
2.4	-	-	-	-	76,4	0,1	86,9	181,5	0,0	0,1
3.1	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,54	182,6	0,1
3.2	-	-	-	-	0,1	0,0	0,0	0,51	97,2	188,8
Внешнее ОЗЗ	0,1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,0	0,5	0,0	0,1



# РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОЗЗ И КЗ



**Особенности УСВИ для распределительных сетей (ЭНЛЗ):**

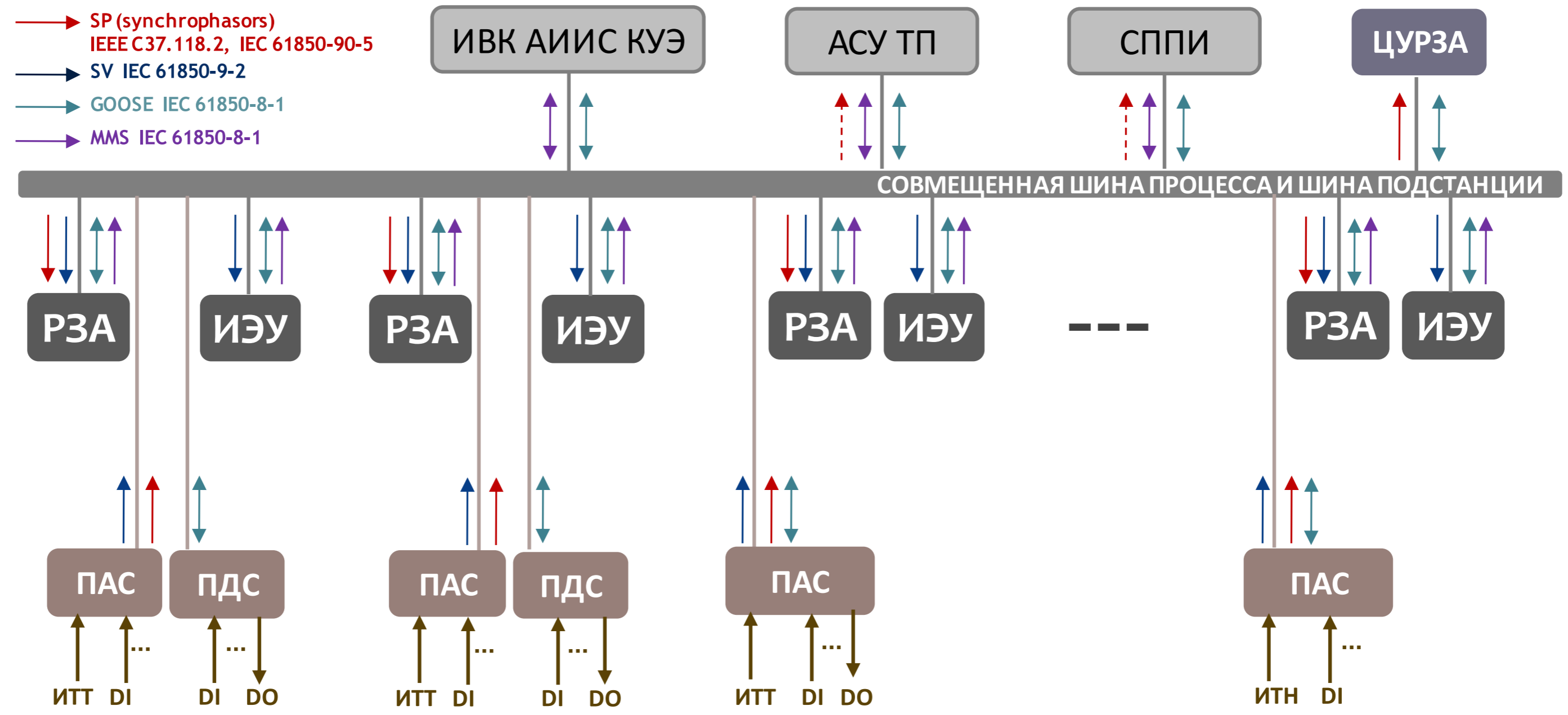
1. подключение к 2 кабельным линиям;
2. низкая стоимость;
3. параметры:

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



**Внедрение:** Архангельский РЭС, Череповецкий РЭС  
 3 КЗ и 17 ОЗЗ      6 КЗ и 20 ОЗЗ

# ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВИ И ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

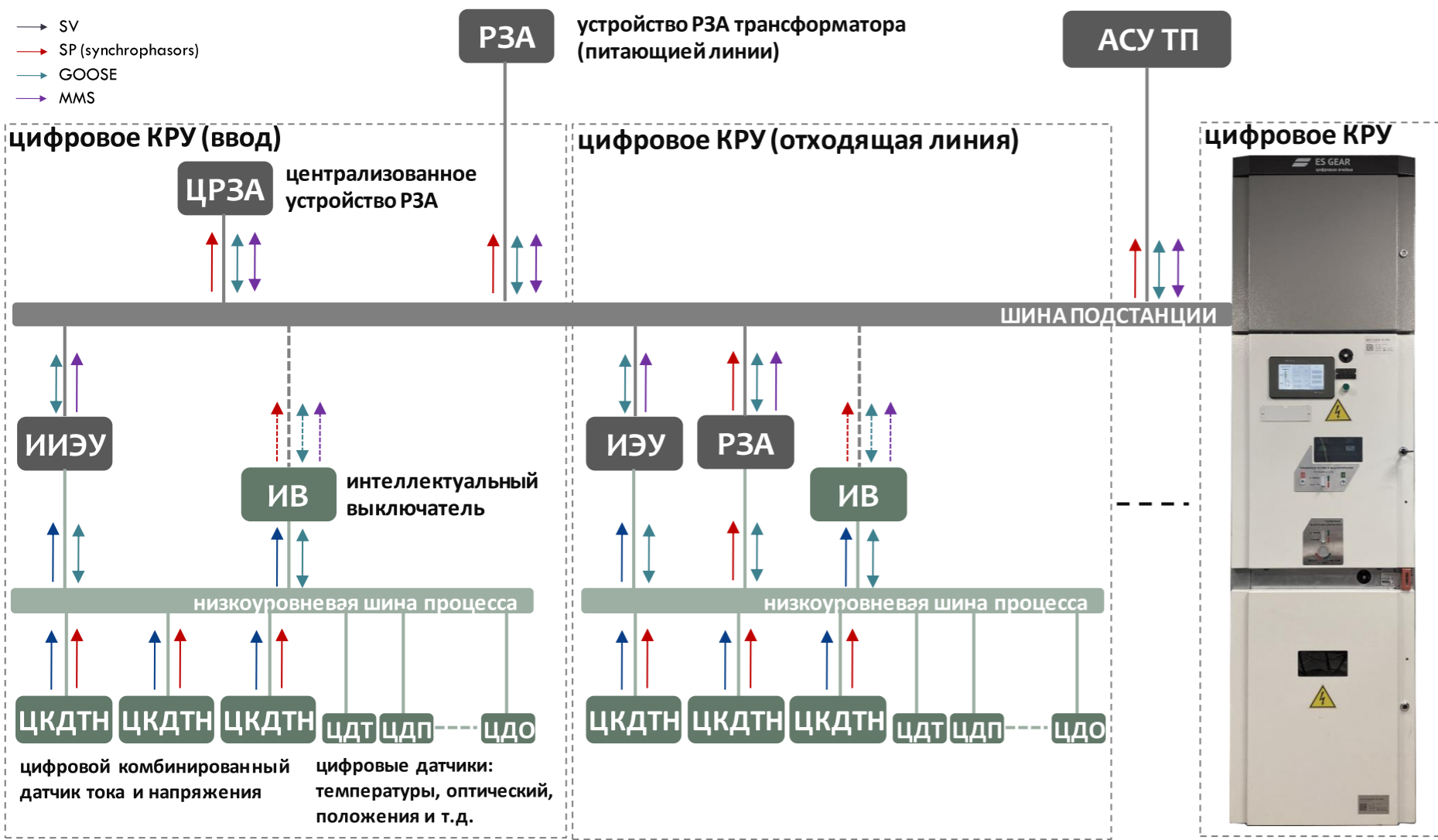


ENMU, обновление 2021

**Совмещенная шина процесса и шина подстанции**

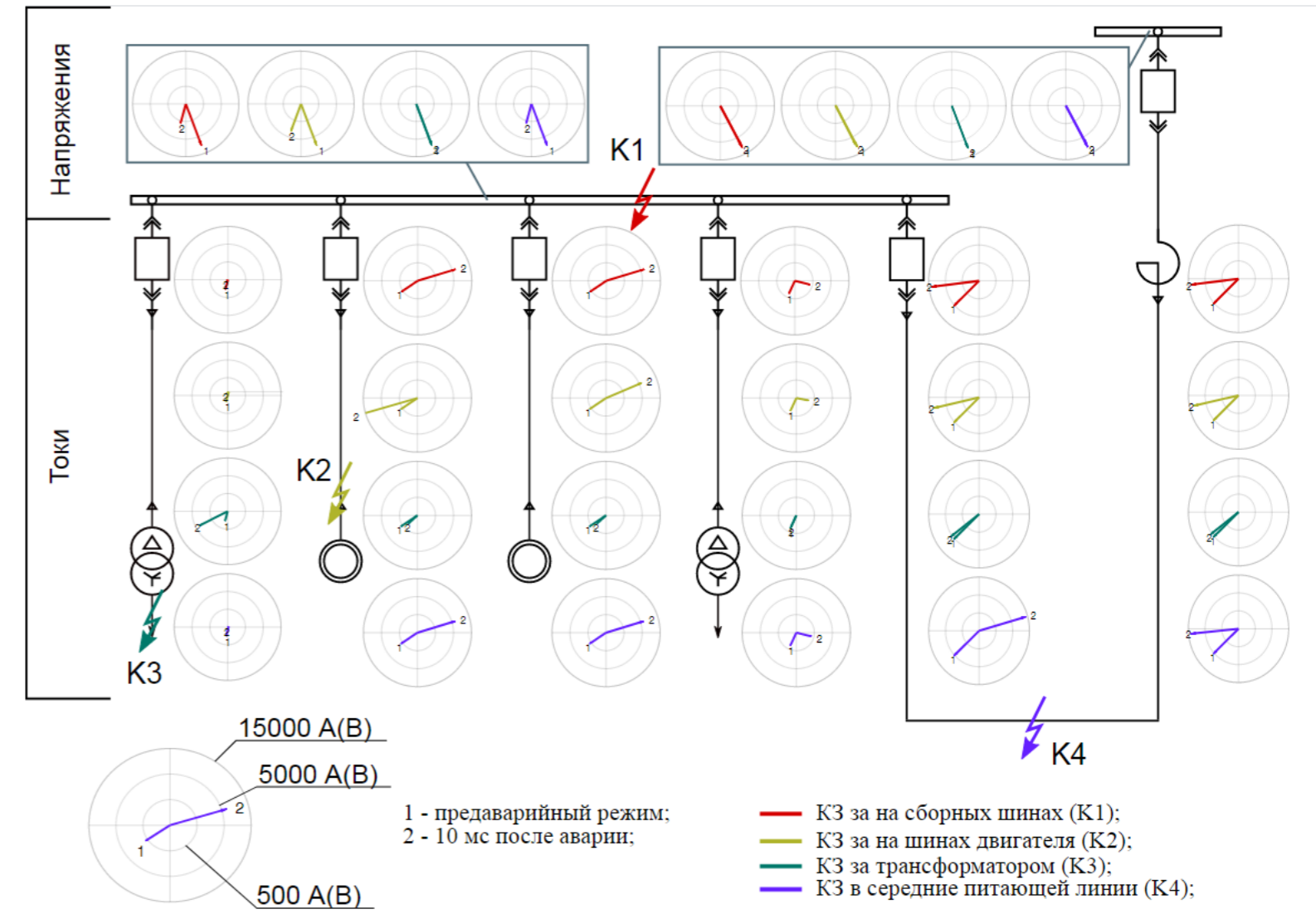
2 x SFP, 1G/100Mb, PRP/HSR, RTP  
2 x 100 Mb

## Трехуровневая структура системы РЗА ППС (РП)



- защита питающей линии (трансформатора);
- защита шин подстанции, отходящих присоединений;
- локализация поврежденных присоединений подстанции (РП, ТП) и участков сети при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ).

На основе использования синхровекторов тока и напряжения в сочетании с быстрыми коммуникациями появляется возможность применять дистанционный и дифференциальный принципы выполнения защиты с использованием дополнительных признаков распознавания аварий.





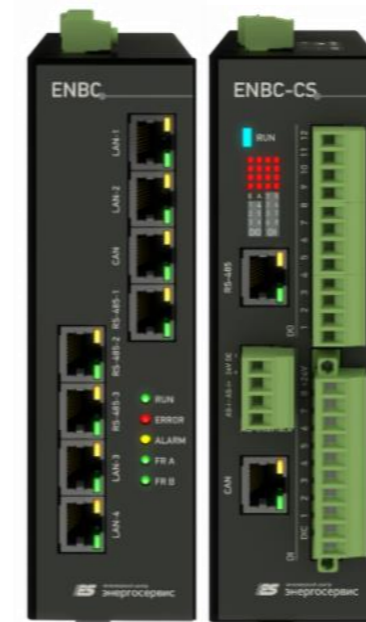
# ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЦИФРОВОГО КРУ



Интеллектуальный  
выключатель VF12



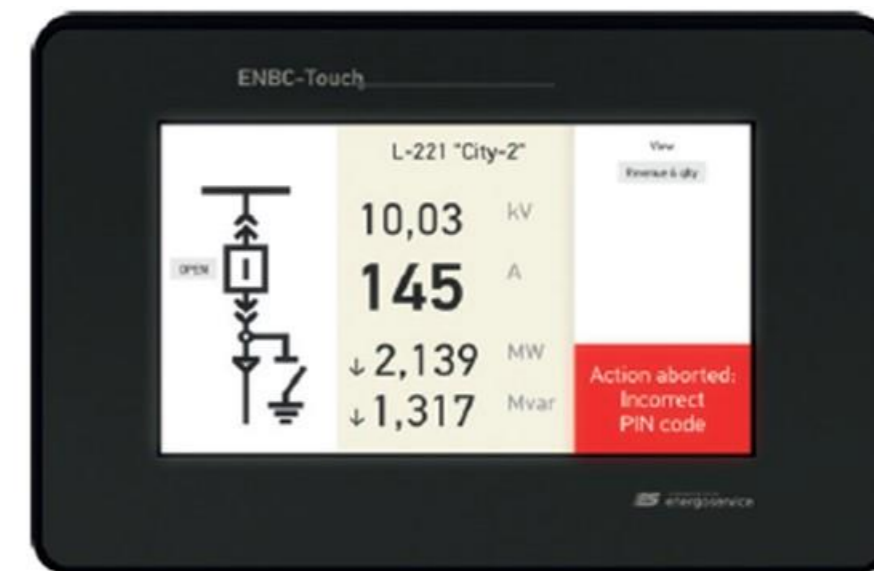
Цифровой  
комбинированный  
трансформатор тока и  
напряжения



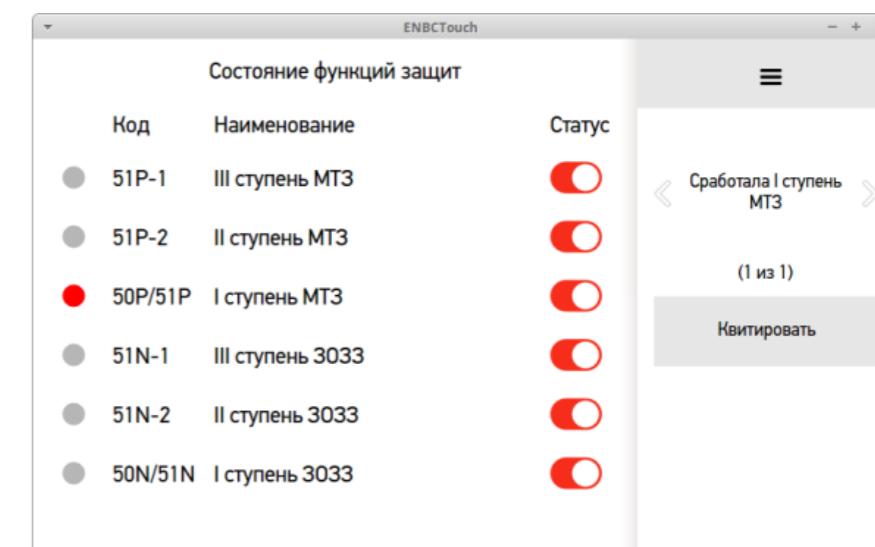
МФУ РЗА  
ENBC



МФУ  
ESM



Модуль индикации



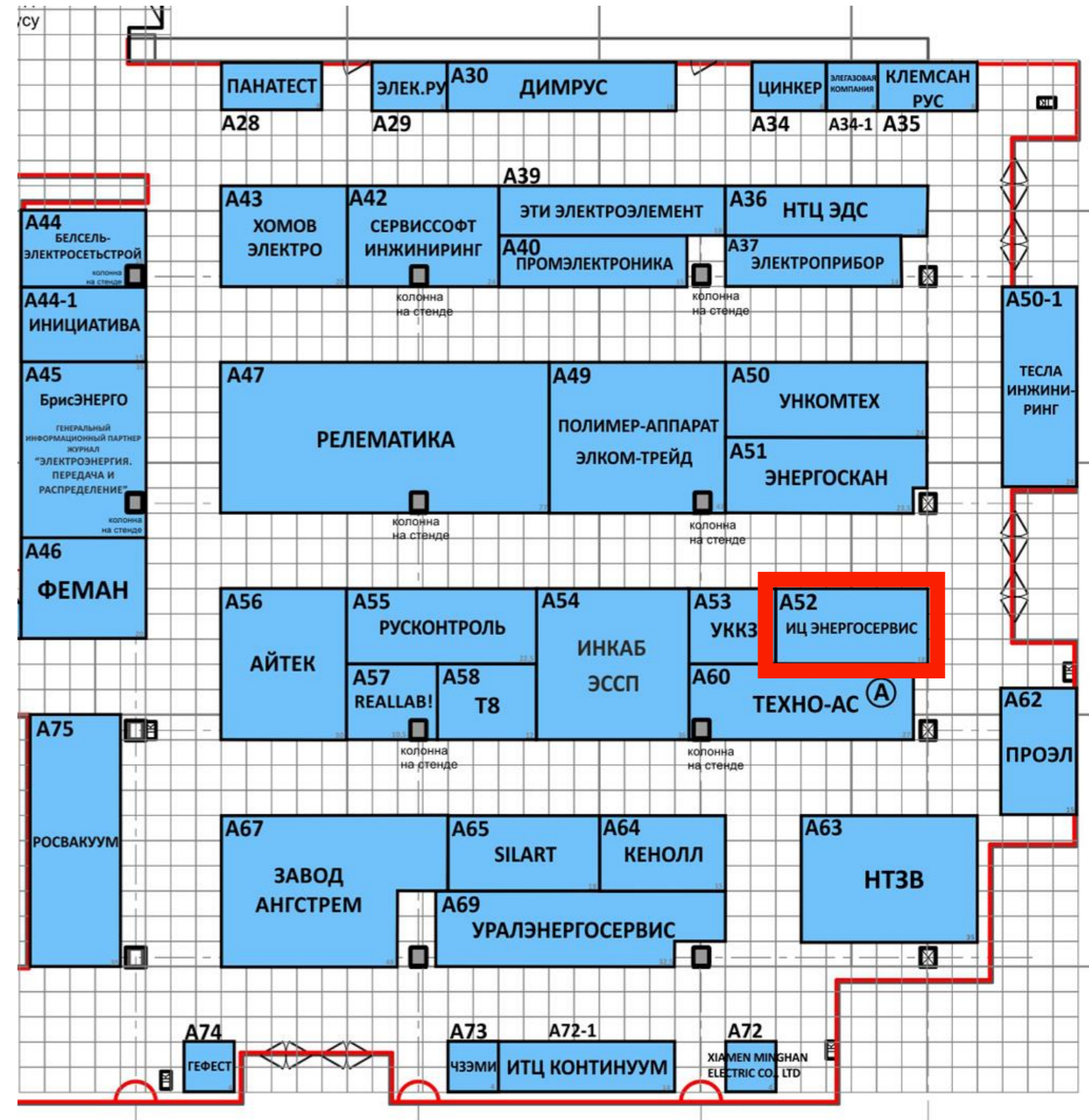


1. Разработаны *быстродействующие алгоритмы дистанционной защиты и ОМП*, которые обладают малой чувствительностью к влиянию нелинейного сопротивления дуги в месте короткого замыкания и обеспечивают *достоверное функционирование устройств в условиях электромагнитных и электромеханических переходных процессов*.
2. Предложены алгоритмы для реализации *виртуальных УСВИ*, верификации данных УСВИ и для *идентификации параметров линии*.
3. Разработаны алгоритмы мониторинга силового трансформатора на основе данных СВИ. Дальнейшее совершенствование системы мониторинга состояния трансформаторов связано с разработкой алгоритмов, обеспечивающих достоверную оценку параметров схемы замещения трансформатора в условиях электромагнитных и электромеханических переходных процессов.
4. Математическое моделирование, лабораторные испытания и опытно-промышленная эксплуатация СМСТ на ПС8 и ПС7 Архэнерго подтвердили целесообразность применения СВИ для мониторинга состояния трансформаторов.
5. Интеграция технологий СВИ и ЦП позволит более эффективно решить задачи внедрения устройств релейной защиты с абсолютной селективностью, в т.ч. и для распределительных устройств и отходящих линий среднего напряжения, и распределенных систем защиты.
6. Для локализации ОЗЗ в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью разработано специализированное устройство с поддержкой СВИ.

# Благодарим за внимание!

Мокеев А.В.,  
профессор Северного (Арктического) федерального университета, д.т.н.,  
[a.mokeev@narfu.ru](mailto:a.mokeev@narfu.ru)  
зам. генерального директора ООО "Инженерный центр "Энергосервис",  
[a.mokeev@ens.ru](mailto:a.mokeev@ens.ru), <http://www.enip2.ru>

Пискунов Сергей Александрович  
аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» САФУ,  
[piskunov.s@edu.narfu.ru](mailto:piskunov.s@edu.narfu.ru)  
инженер группы комплексного проектирования  
ООО "Инженерный центр "Энергосервис",  
[s.piskunov@ens.ru](mailto:s.piskunov@ens.ru)



Павильон 57, 1 этаж, стенд А52