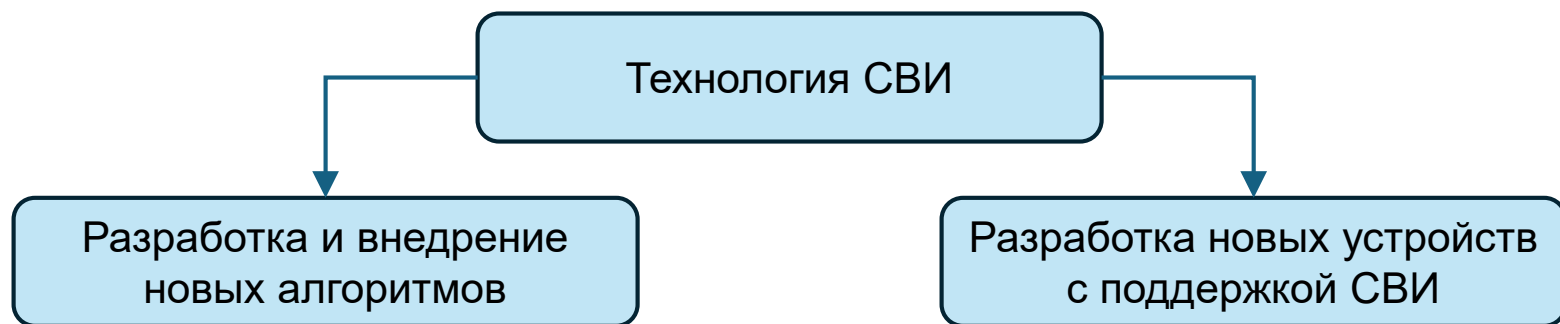


ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ РЗА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пискунов С.А., Мокеев А.В., Мартынов А.Н., Назаров Н.Ф.

13-17 июля 2026, г. Санкт-Петербург



Предлагаемые подходы:

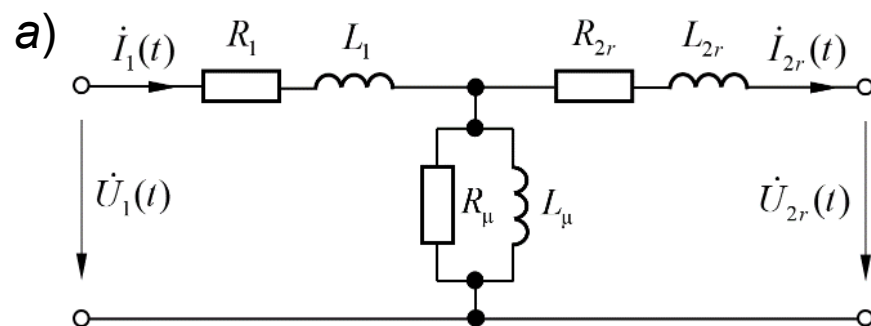
- применение потоков синхровекторов напряжения и тока (*SP-потоки*) в системах РЗА СН
- распространение многосторонних измерений синхровекторов напряжения и тока
- построение многоуровневых систем РЗА и мониторинга
- применение современных цифровых ТТ и ТН с измерением и передачей SP-потоков
- интеграция СВИ в составе цифровой подстанции

Особенности:

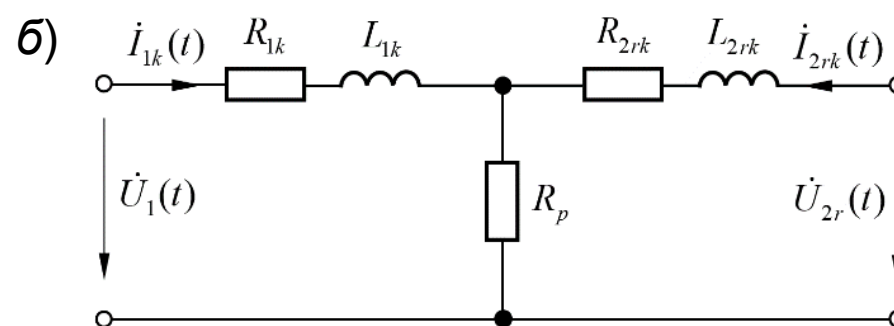
- интеграция и обмен данными между устройствами РЗА и системами мониторинга сети и оборудования
- многофункциональные ИЭУ с поддержкой технологии СВИ
- принцип «два ИЭУ на присоединение»
- разработка специализированных решений для сетей 6-10 кВ

Сравнение объемов сетевого трафика, Мб/с

Тип / Кол-во точек на период	96	24	16	8
SV, IEC 61869 (4х i + 4х u)	3,7	-	-	-
3 однофазных SP, IEC 61850-9-2	-	2,5	1,7	0,8
трехфазный SP, IEC 61850-9-2	-	1,5	1,0	0,5



Классический подход



Предлагаемый подход

а) схема замещения СТ в нормальном режиме (при внешних КЗ)

б) КЗ в трансформаторе

уравнение на основе 2-го закона Кирхгофа:

$$\underline{z}_1 i_1(t) - \underline{z}_{2r} i_{2r}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_{2r}(t) = \Delta \dot{U}_{12}(t)$$

$$\underline{z}_1 i_1(t) + \underline{L}_1 i'_1(t) - \underline{z}_{2r} i_{2r}(t) - \underline{L}_{2r} i'_{2r}(t) = \Delta \dot{U}_{12}(t)$$

оценка модуля дифференциального тока:

$$I_{\Delta}(t) = |i_1(t) + i_{2r}(t)| = \left| \frac{\Delta \dot{U}_{12}(t) + \underline{z}_{12} i_{2r}(t)}{\underline{z}_{12}} \right| = |i_{\mu}(t)|$$

$$I_{\Delta}(t) = |i_1(t) + \underline{k} i'_1(t) + i_{2r}(t) + \underline{k} i'_{2r}(t)|$$

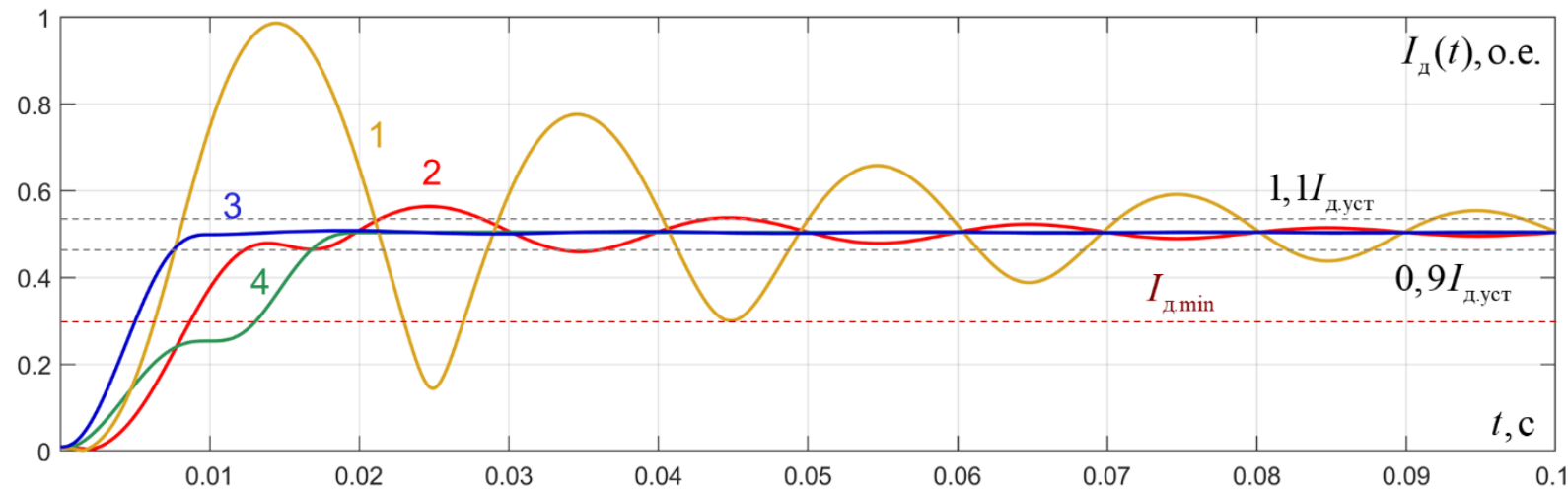
тормозной ток и оценка фазы между векторами токов:

$$I_{\tau}(t) = \frac{|i_1(t)| + |i_{2r}(t)|}{2}, \varphi_{\Delta}(t) = \arg\left(\frac{i_1(t)}{i_{2r}(t)}\right)$$

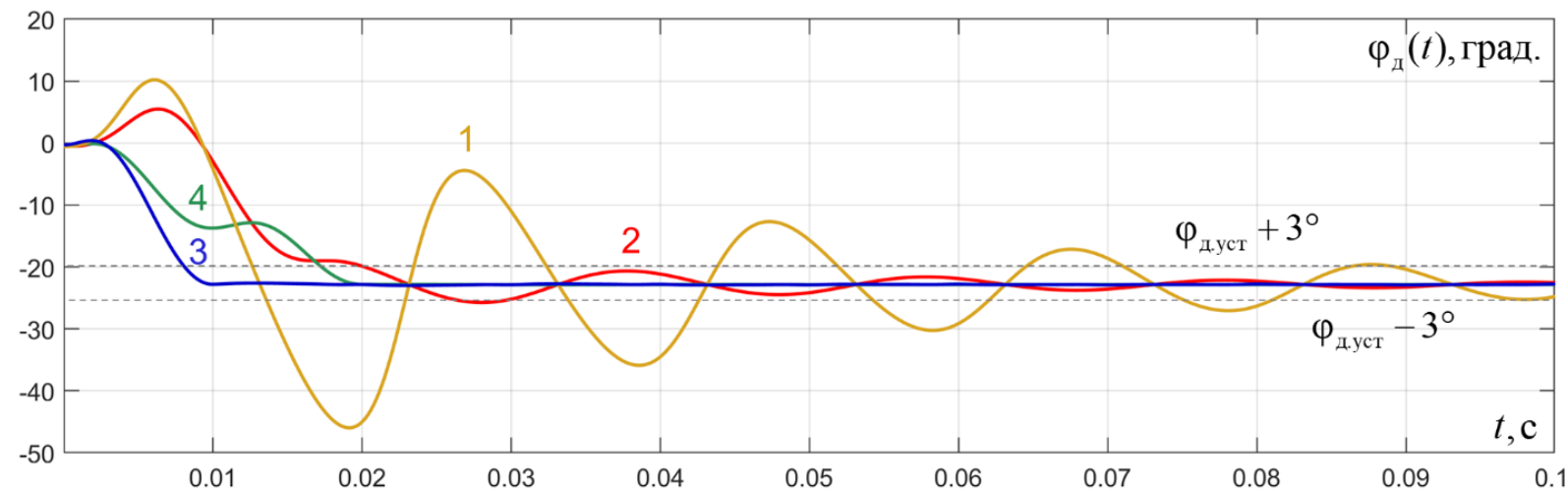
$$I_{\tau}(t) = \frac{|i_1(t) + \underline{k} i'_1(t)| + |i_{2r}(t) + \underline{k} i'_{2r}(t)|}{2}, \varphi_{\Delta}(t) = \arg\left(\frac{i_1(t) + \underline{k} i'_1(t)}{i_{2r}(t) + \underline{k} i'_{2r}(t)}\right)$$



Оценка модуля дифференциального тока



Оценка фазы между векторами тока трансформатора



Обозначения:

№ 1-4 алгоритм Фурье

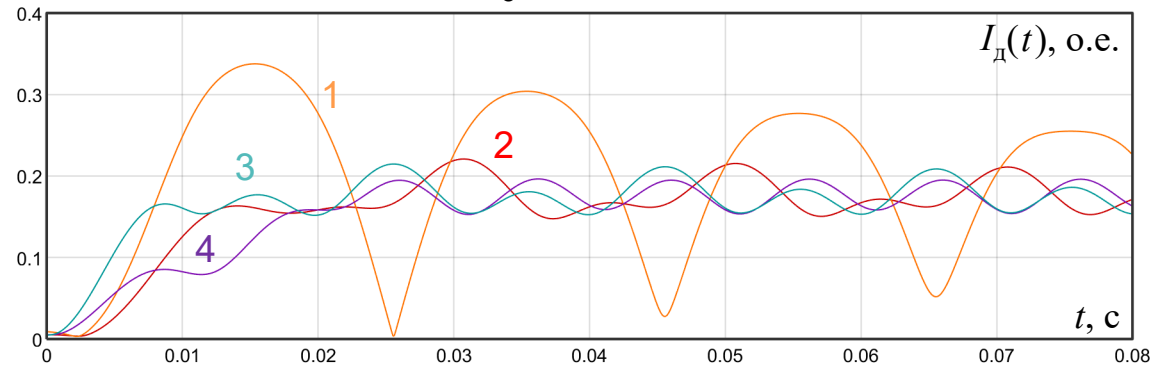
- 1 – традиционный способ, 10 мс,
- 2 – традиционный способ, 20 мс,
- 3 – разработанный способ, 10 мс,
- 4 – разработанный способ, 20 мс

Сравнение способов оценки

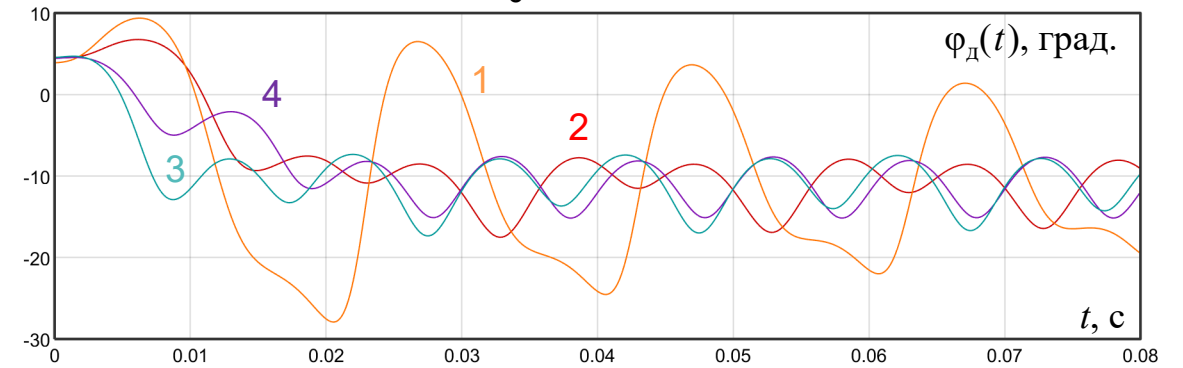
№	Время, мс		
	$I_{д} > I_{д.min}$	$I_{д} = 0,9 \div 1,1 I_{д.уст}$	$\varphi_{д} = \varphi_{д.уст} \pm 3^{\circ}$
1	6,3	> 100	97,5
2	8,9	45,8	25,7
3	5	7,5	8
4	12,9	16,7	16,9



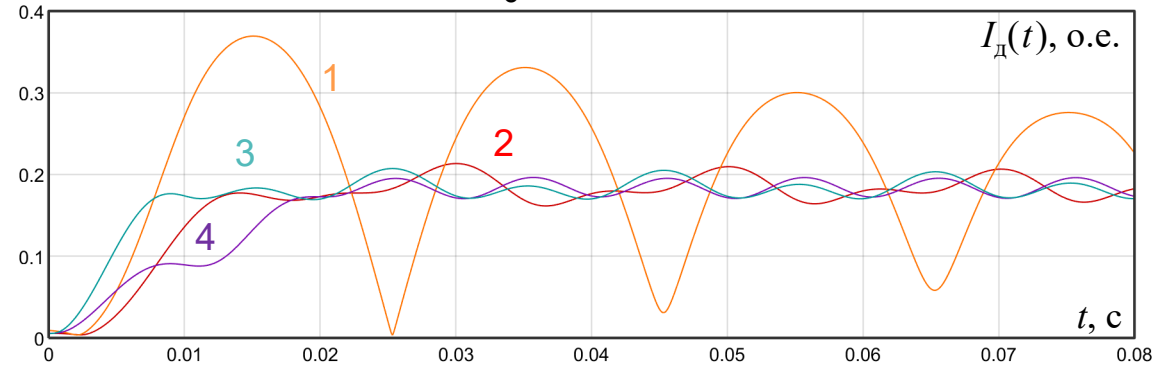
$f_0 = 45 \text{ Гц}$



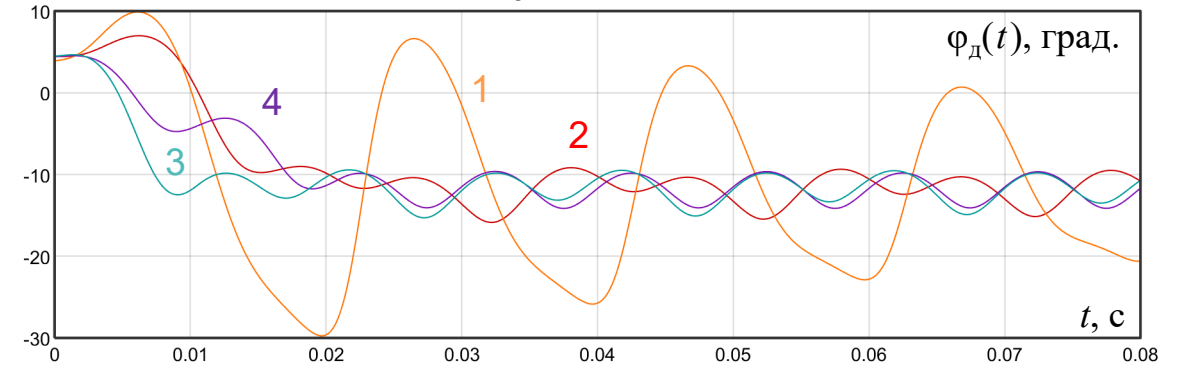
$f_0 = 45 \text{ Гц}$



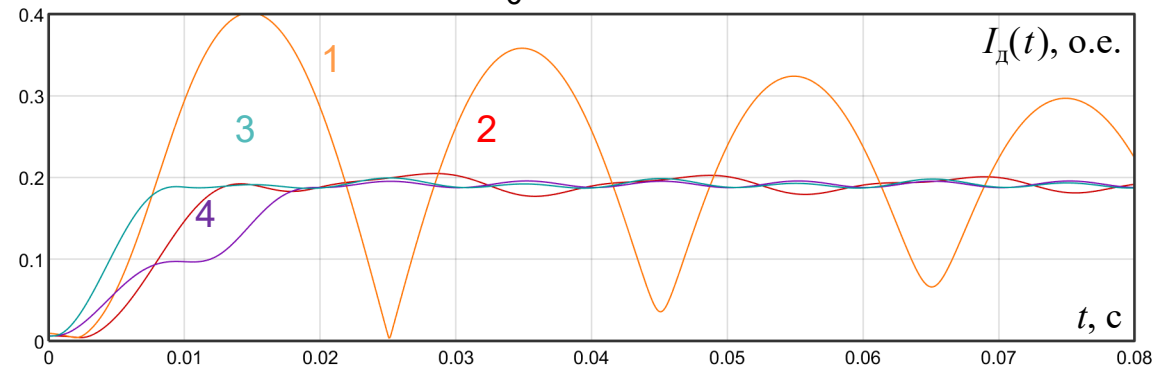
$f_0 = 47 \text{ Гц}$



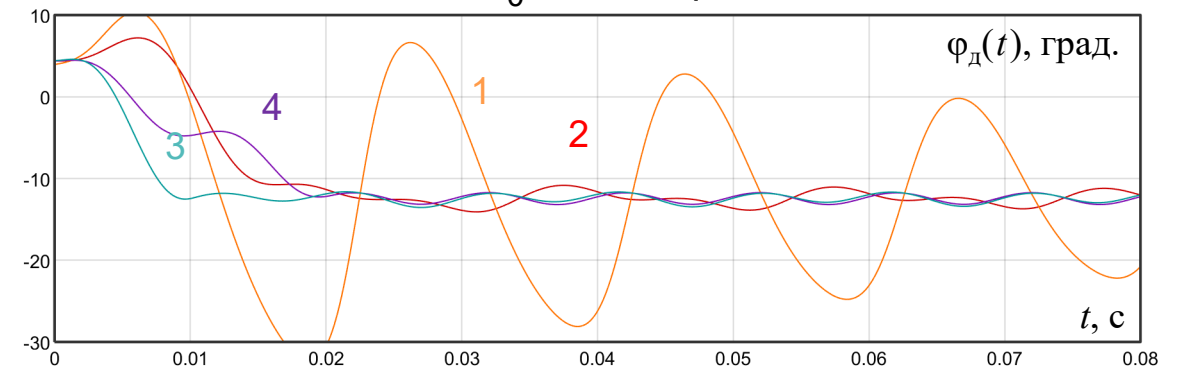
$f_0 = 47 \text{ Гц}$



$f_0 = 49 \text{ Гц}$

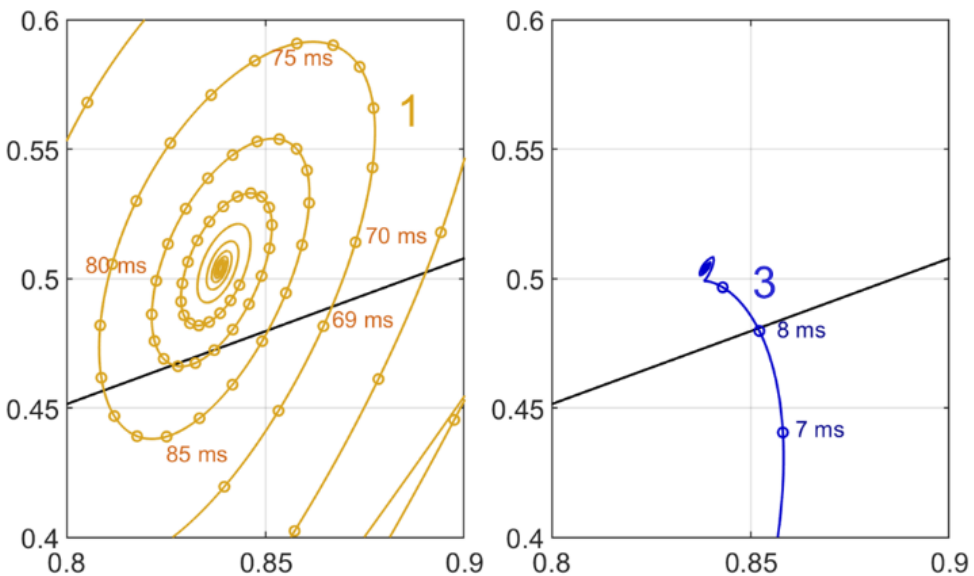
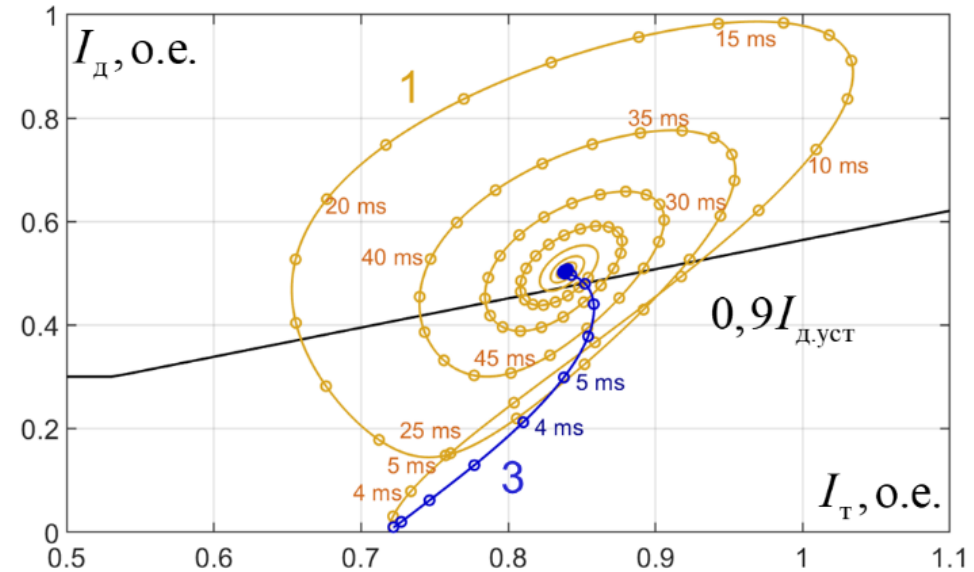
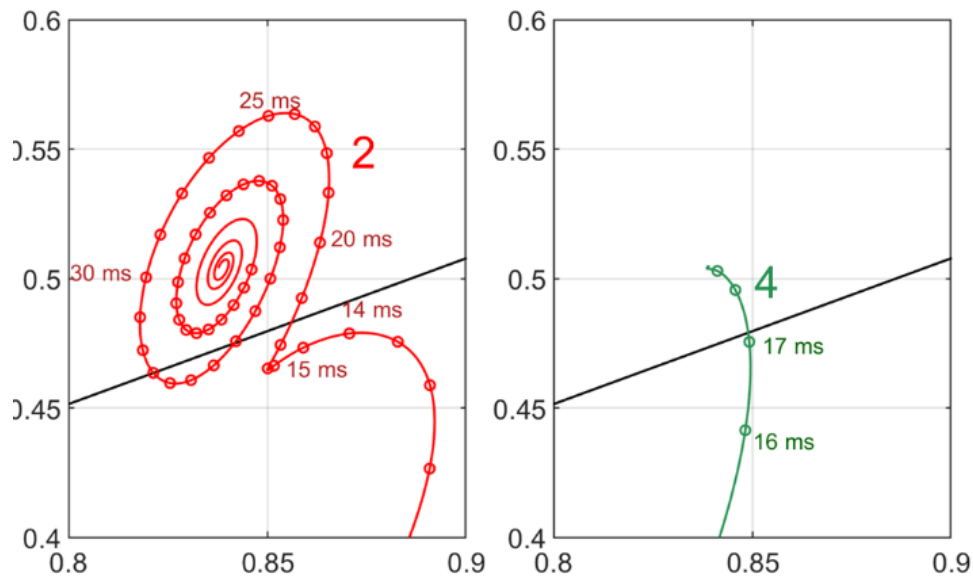
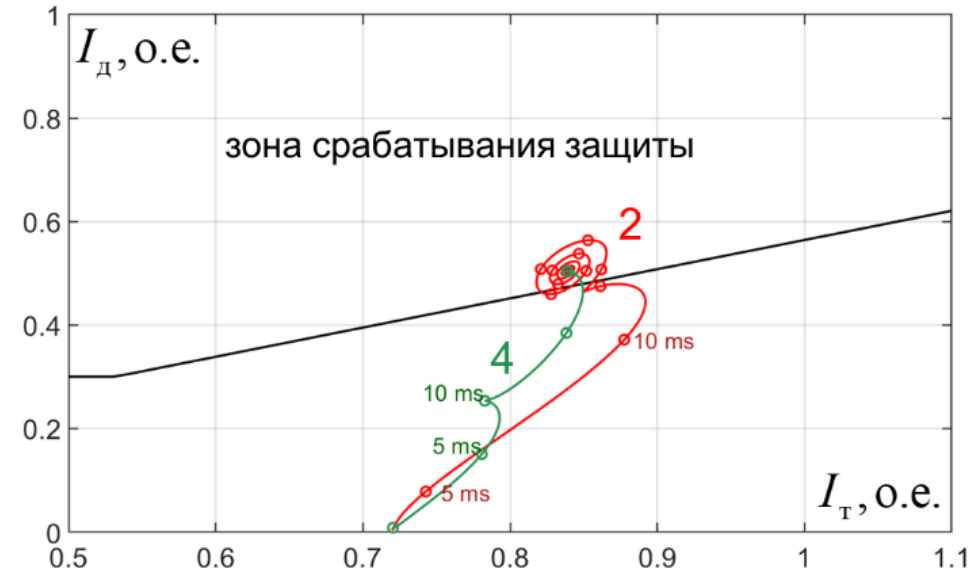


$f_0 = 49 \text{ Гц}$





Характеристика срабатывания дифференциальной защиты трансформатора



Обозначения:

№ 1-4 алгоритм
Фурье

1 – традиционный
способ, 10 мс,

2 – традиционный
способ, 20 мс,

3 – разработанный способ, 10 мс,

4 – разработанный способ, 20 мс



Оценка сопротивления трансформатора:

$$\hat{\underline{z}}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_{2r}(t)}{\dot{I}_1(t) + \underline{kl}'_1(t)}, \hat{\underline{z}}_{21}(t) = \frac{\dot{U}_{2r}(t) - \dot{U}_1(t)}{\dot{I}_{2r}(t) + \underline{kl}'_{2r}(t)}$$

Согласно дифференциальному принципу защиты:

$$\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21}, \hat{\underline{z}}_{12}(t) - \hat{\underline{z}}_{21}(t) \approx 0$$

Отсюда:

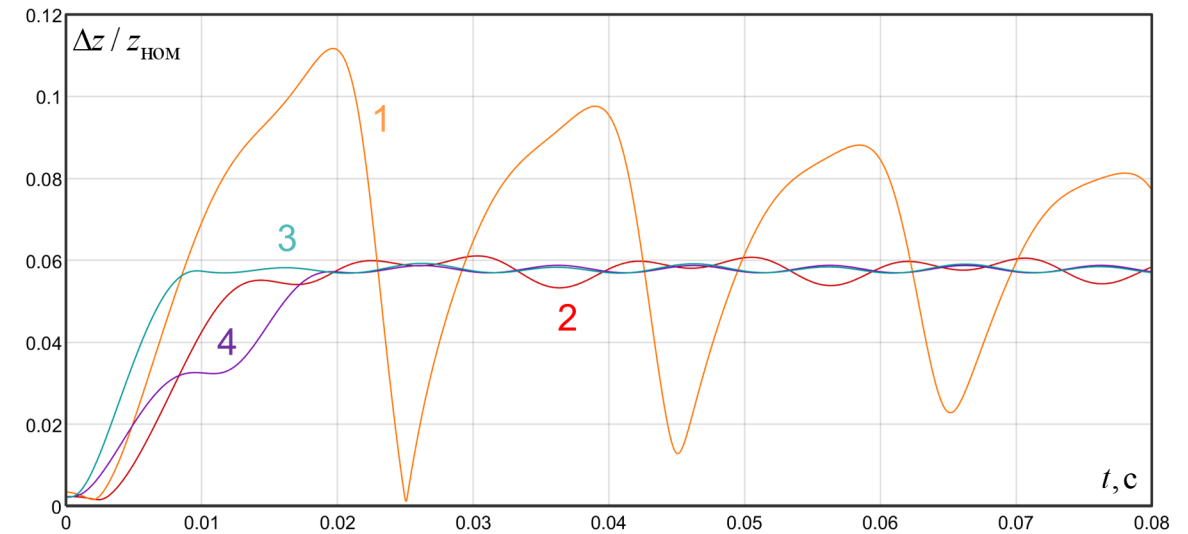
$$\Delta \hat{\underline{z}}(t) = \frac{\Delta \dot{U}_{12}(t) (\dot{I}_1(t) + \underline{kl}'_1(t) + \dot{I}_{2r}(t) + \underline{kl}'_{2r}(t))}{(\dot{I}_1(t) + \underline{kl}'_1(t)) (\dot{I}_{2r}(t) + \underline{kl}'_{2r}(t))}$$

Контроль сопротивления поперечной ветви:

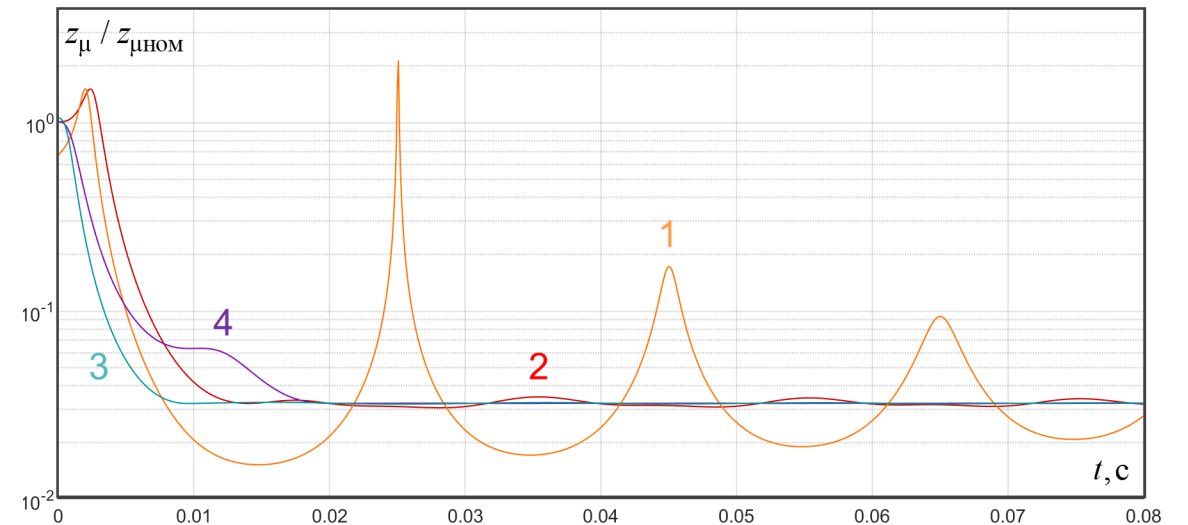
$$\hat{\underline{z}}_{\mu}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \underline{z}_1 (\dot{I}_1(t) + \underline{kl}'_1(t))}{\dot{I}_1(t) + \underline{kl}'_1(t) + \dot{I}_{2r}(t) + \underline{kl}'_{2r}(t)}$$

Пример. ВЗ в обмотке ВН при частоте 49,5 Гц

Оценка модуля сопротивления ΔZ



Оценка модуля сопротивления Z_{μ}





Оценка потерь мощности в трансформаторе на основе предложенного подхода:

$$\dot{S}_д(t) = \dot{S}_1(t) - \dot{S}_2(t) = \dot{U}_1(t)(i_{1*}(t) + \underline{ki}'_1(t)) + \dot{U}_2(t)(i_{2*}(t) + \underline{ki}'_2(t))$$

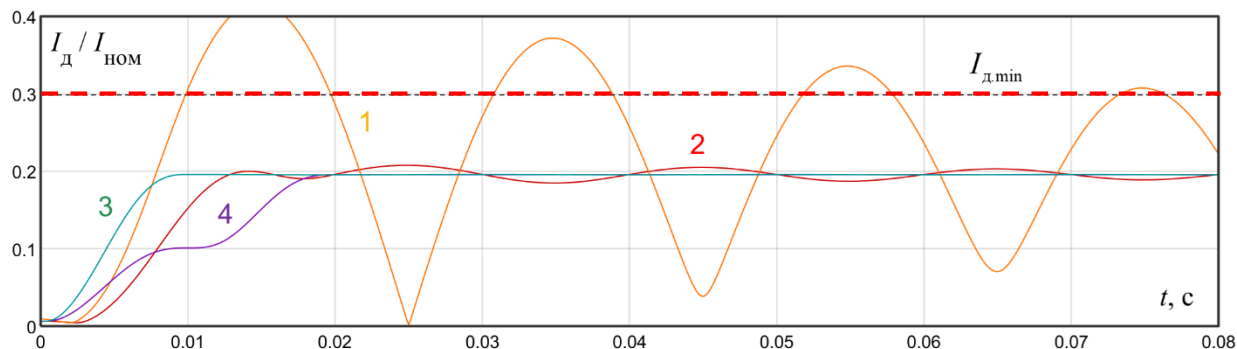
$i_{1*}(t), i_{2*}(t)$ - комплексно-сопряженные синхровекторы токов

Сравнение с теоретическими потерями в трансформаторе при заданной нагрузке:

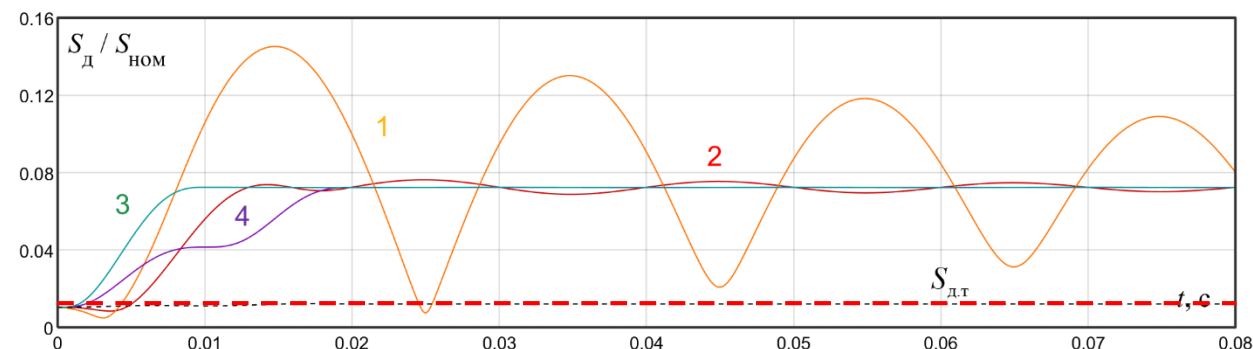
$$\dot{S}_{дт}(t) = \underline{z}_1 |i_1(t) + \underline{ki}'_1(t)|^2 + \underline{z}_2 |i_2(t) + \underline{ki}'_2(t)|^2 + \frac{|\dot{U}_1(t) - \underline{z}_1(i_1(t) + \underline{ki}'_1(t))|^2}{\underline{z}_{\mu*}}$$

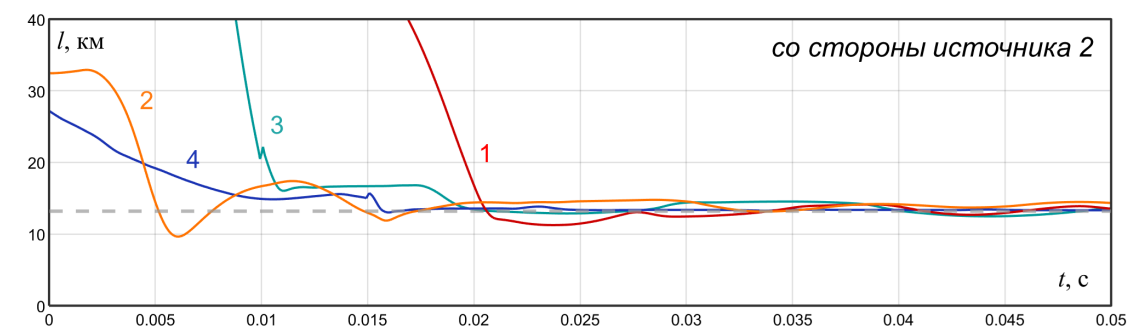
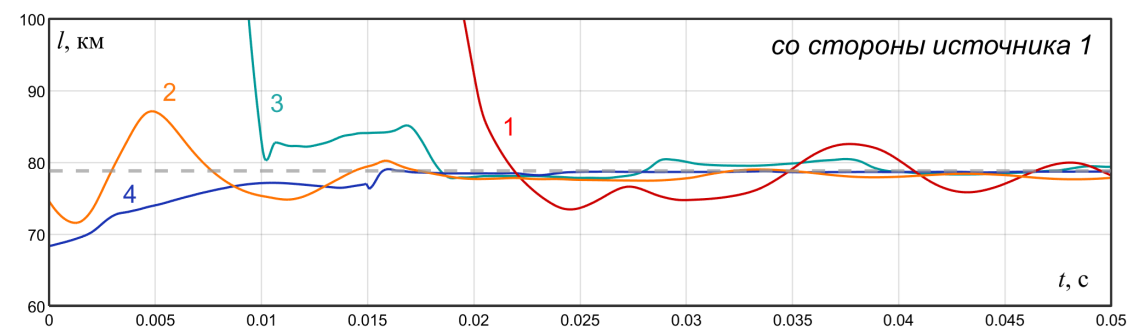
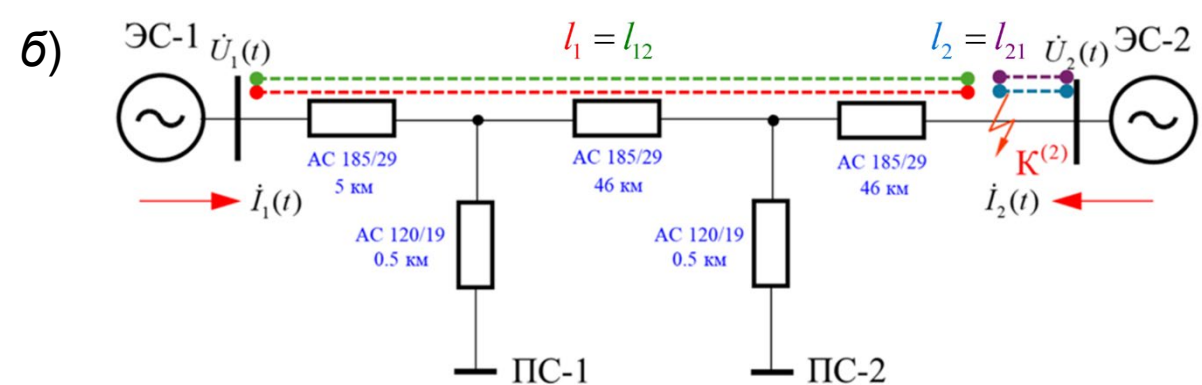
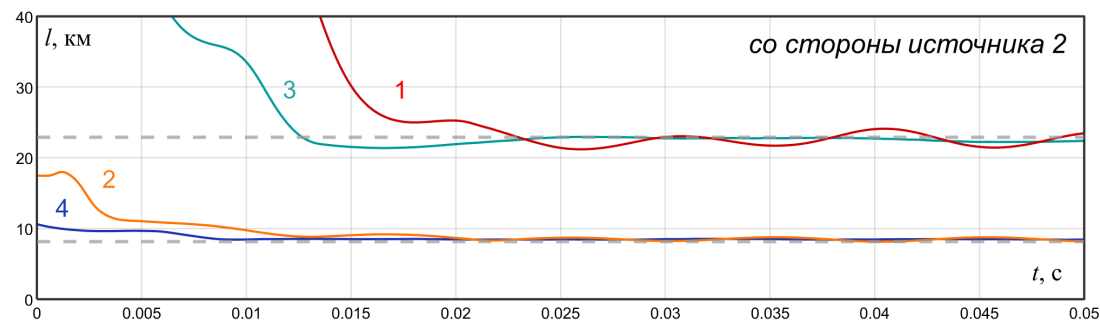
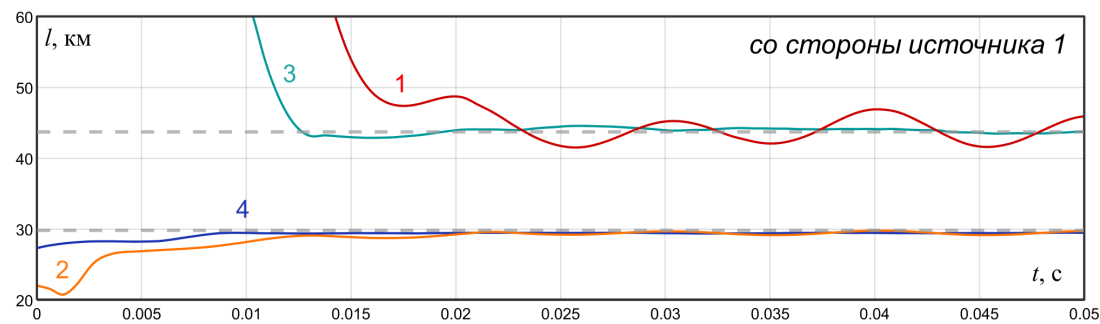
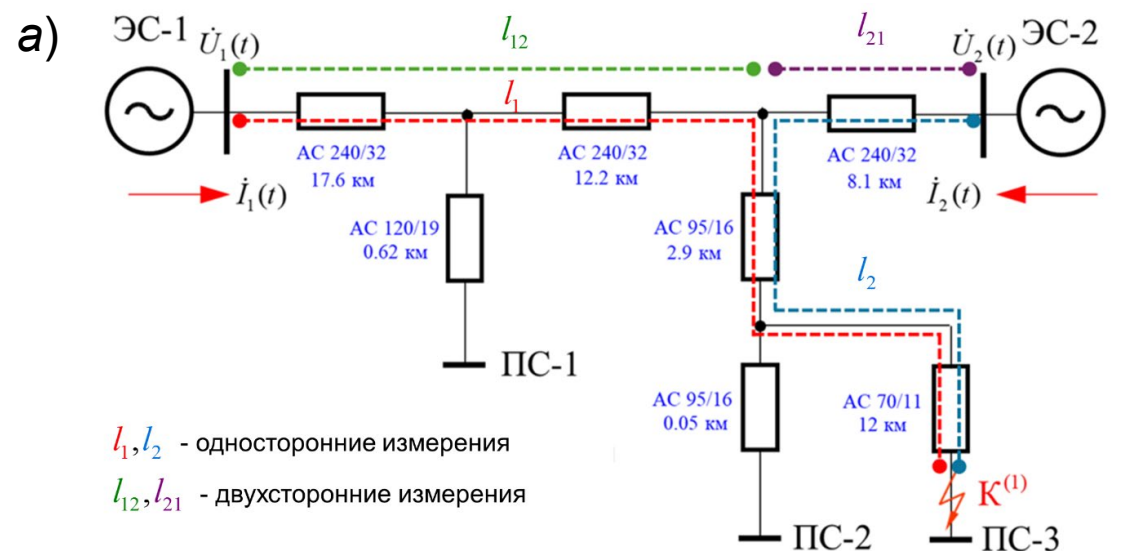
Моделирование замыкания 1 % витков обмотки ВН в силовом трансформаторе

Дифференциальный ток



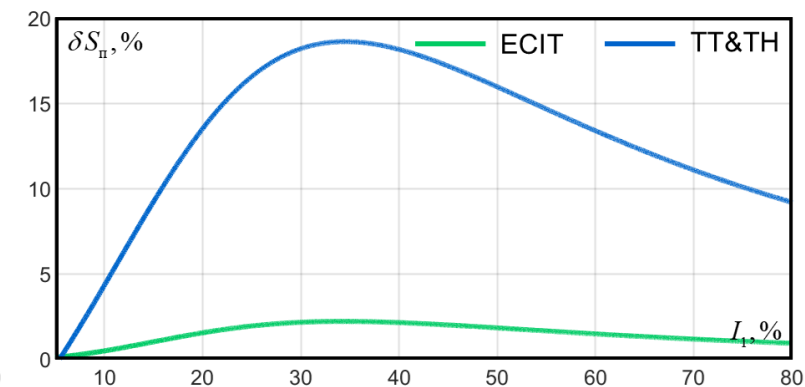
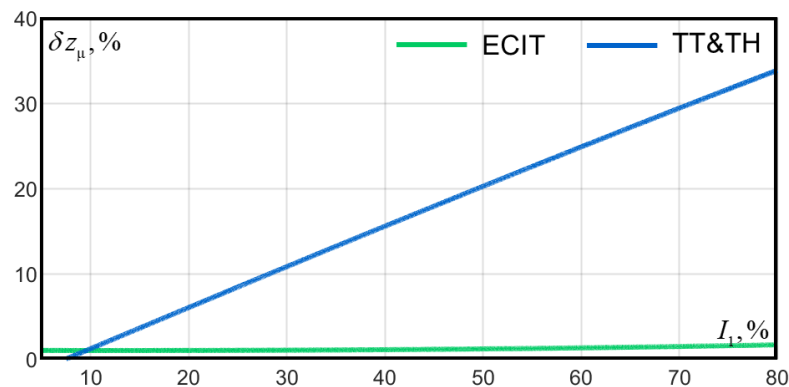
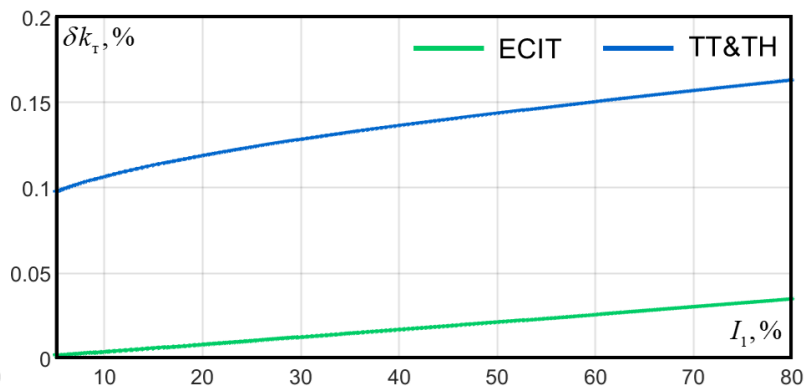
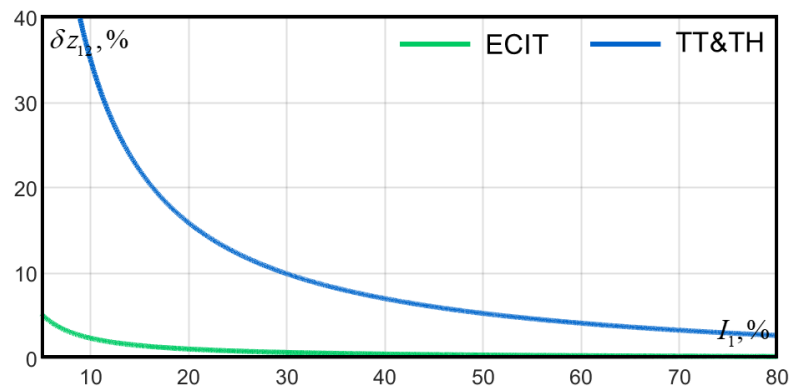
Потери мощности



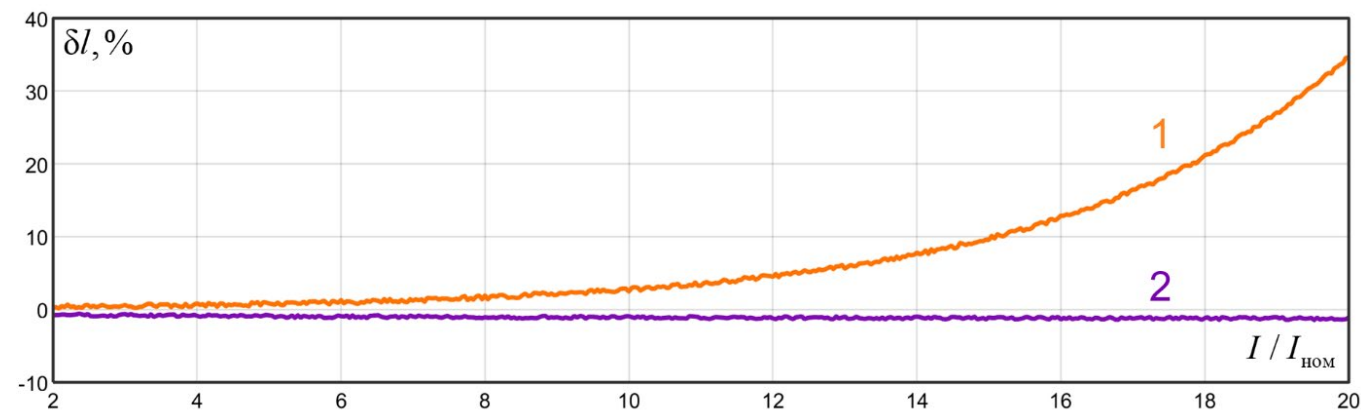
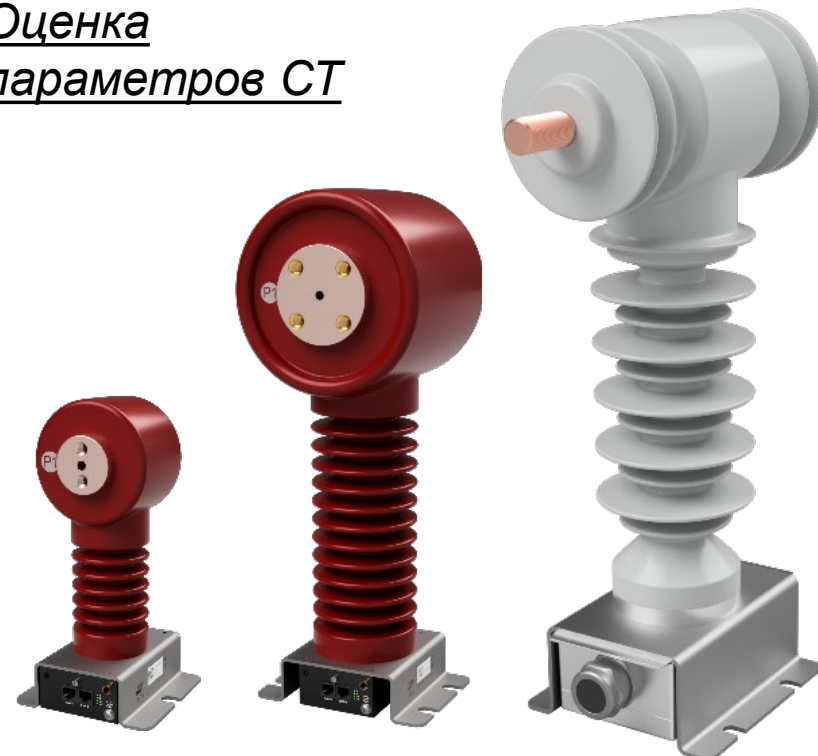


а) короткое замыкание на отпайке линии 110 кВ

б) короткое замыкание в линии 110 кВ



Оценка параметров СТ



Оценка расстояния до места КЗ

1 – электромагнитные ТТ

2 – цифровые ТТ



Лабораторная установка:

ЕСИТ-1 – цифровой ТТ, ТН со встроенной функцией дистанционной защиты

OMICRON – испытательное устройство

Эксперимент:

ЕСИТ-1 производит оценку сопротивления петли КЗ разработанным способом

Параметры установки:

$U_H = 100 \text{ В}$, $I_K = 20 \text{ А}$, $\tau = 0,2 \text{ с}$

Параметры линии:

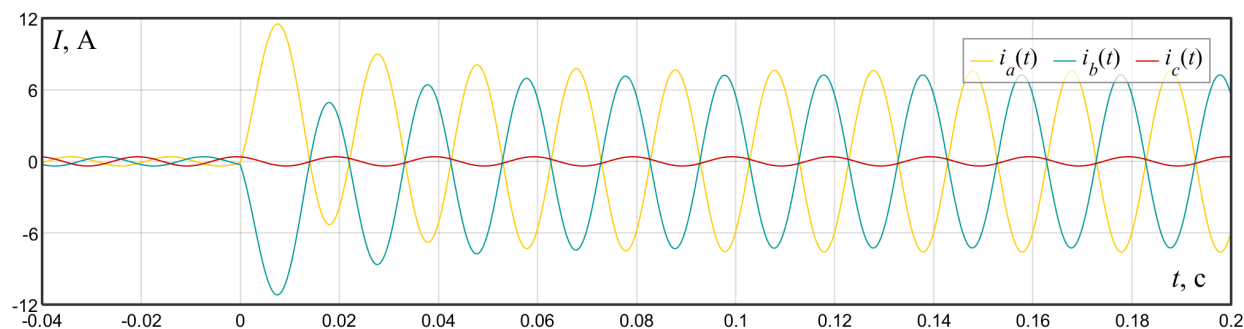
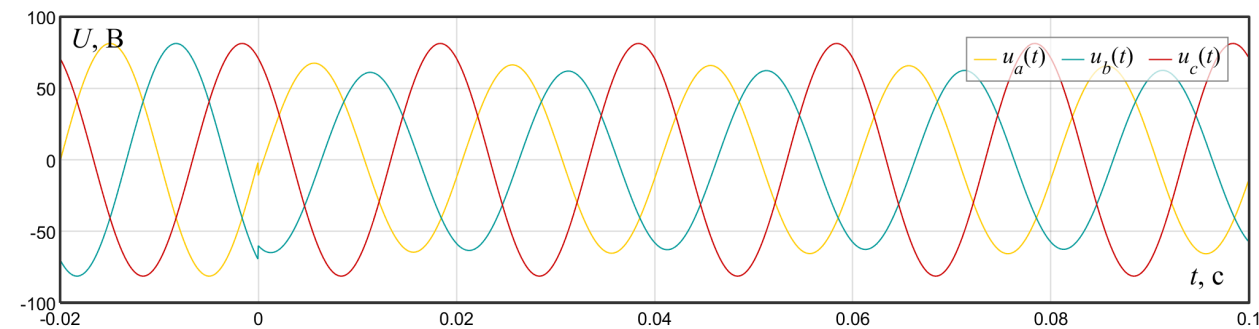
$R_{уд} = 0,15 \text{ Ом/км}$, $L_{уд} = 0,65 \text{ Ом/км}$, $l = 10 \text{ км}$

1 – оценка традиционным способом, теоретическое значение

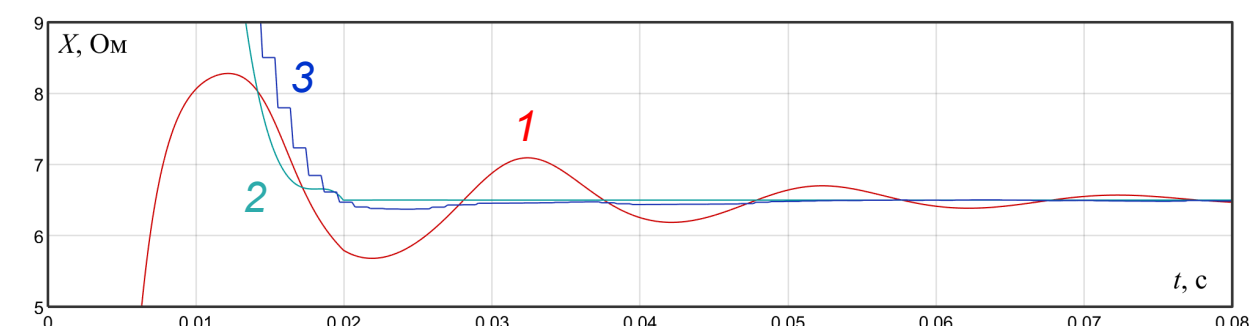
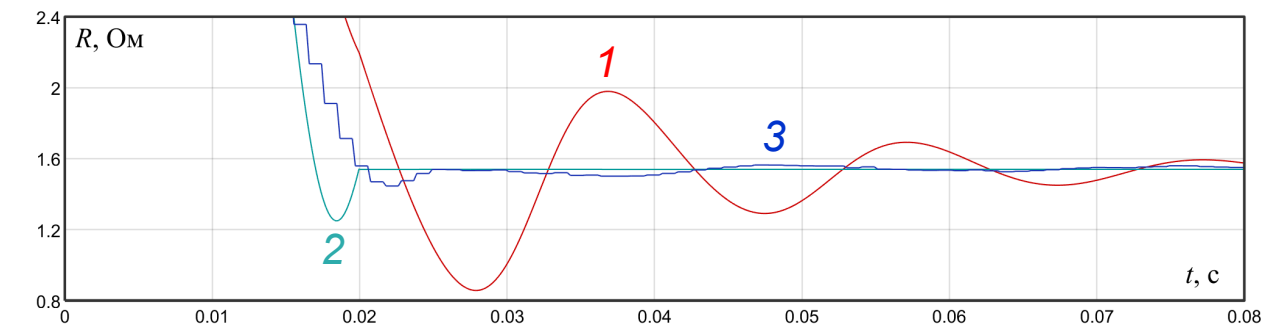
2 – оценка разработанным способом, теоретическое значение

3 – оценка разработанным способом, измерение, выполненное в ЕСИТ

Осциллограмма подаваемых напряжений и токов



Результат оценки сопротивления петли КЗ

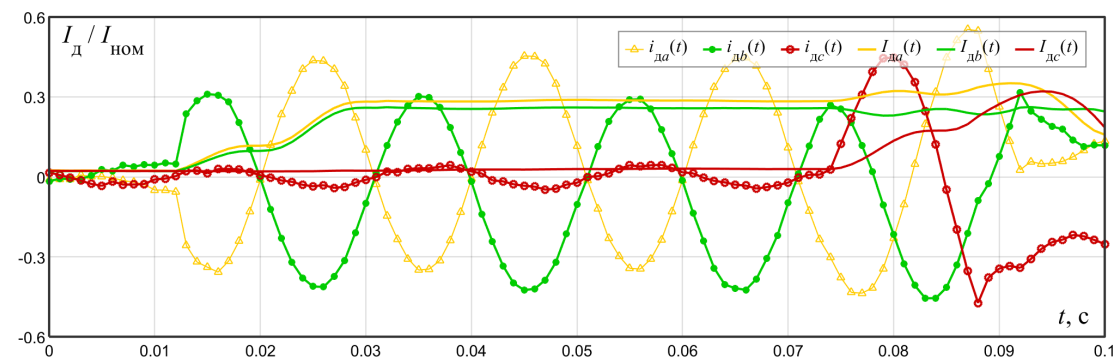




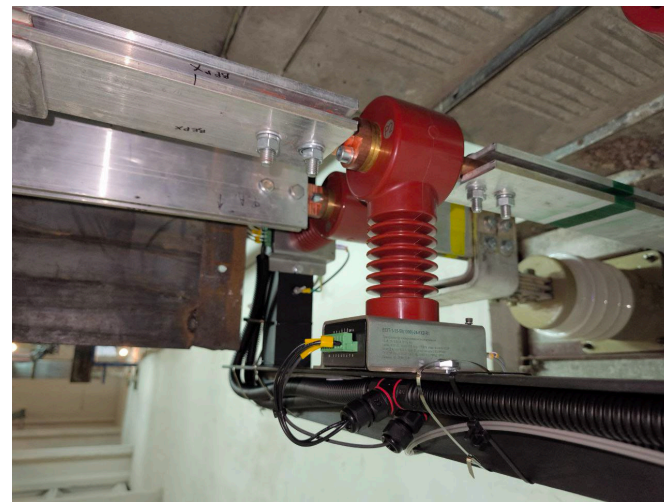
ПС Орбита 110/10 кВ 25 МВА (трансформатор с расщепленной обмоткой), Республика Коми



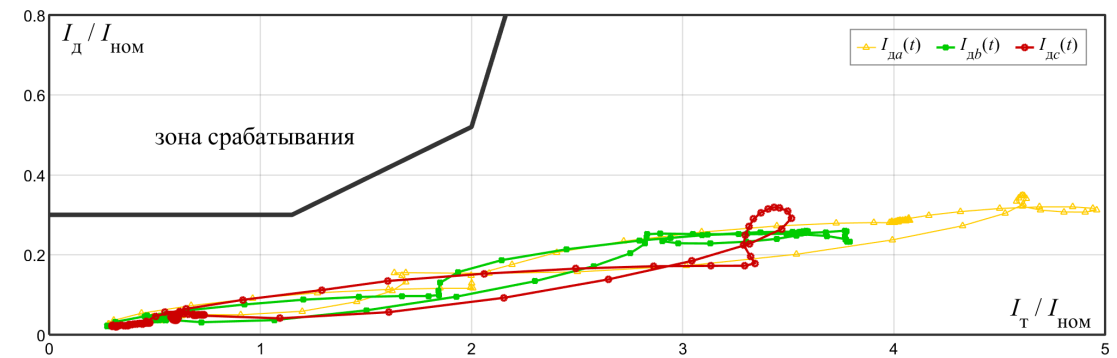
Осциллограмма внешнего КЗ за трансформатором



РЗА + АСМД на базе цифровых ТН, ТТ



Характеристика срабатывания защиты





- ❑ использование преимуществ технологии СВЧ позволяет повысить надежность и расширить функциональные возможности устройств РЗА;
- ❑ на основе предложенных авторами методов анализа разработаны алгоритмы для защит линий электропередачи и силовых трансформаторов;
- ❑ применение цифровых комбинированных измерительных трансформаторов тока и напряжения позволит значительно улучшить основные показатели качества обработки сигналов в устройствах и системах РЗА, прежде всего точность обработки сигналов и быстродействие;
- ❑ дальнейшее направление исследований связано с разработкой алгоритмов устройств автоматики на основе использования преимуществ технологии векторных измерений.



Благодарим за внимание!

Пискунов Сергей Александрович, s.piskunov@ens.ru