



КАЗАНЬ, 1 – 3 ОКТЯБРЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ – 2025**

ES инженерный центр
энергосервис

**Применение и развитие технологии СВИ
для совершенствования систем
автоматизации распределительных сетей**

Пискунов Сергей Александрович
инженер группы комплексного проектирования
ООО «Инженерный центр «Энергосервис»
Россия



Актуальность применения СВИ для автоматизации РС



- усложнение конфигурации распределительных сетей (РС);
- низкий уровень автоматизации центров питания;
- новые требования к системам автоматизации подстанции;
- развитие сетей с распределенной генерацией;
- ограничения в эффективности традиционных принципов выполнения защит;
- развитие цифрового измерительного оборудования и многофункциональных ИЭУ.

Задачи:

- формирование новых подходов к системам автоматизации центров питания;
- развитие технологии СВИ для целей релейной защиты РС;
- разработка алгоритмов систем защиты и мониторинга состояния на основе СВИ;
- тестирование разработанных алгоритмов на реальных данных.



Математические модели линии в синхровекторах

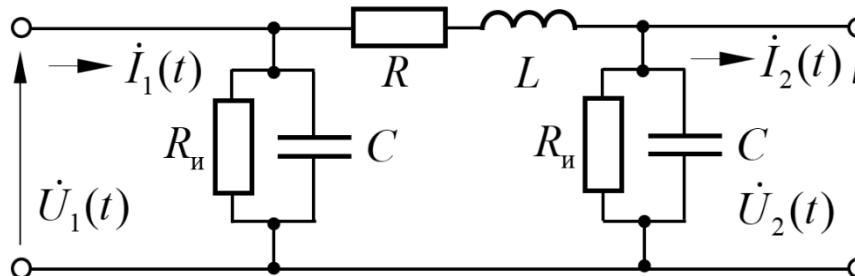


Рис.1 – Нормальный режим работы

$$\begin{cases} R(\dot{I}_1(t) - C\dot{V}'_1(t)) + L(\dot{J}'_1(t) - C\dot{V}''_1(t)) = \Delta\dot{U}(t) \\ R(\dot{I}_2(t) + C\dot{V}'_2(t)) + L(\dot{J}'_2(t) - C\dot{V}''_2(t)) = \Delta\dot{U}(t) \end{cases} \quad (1)$$

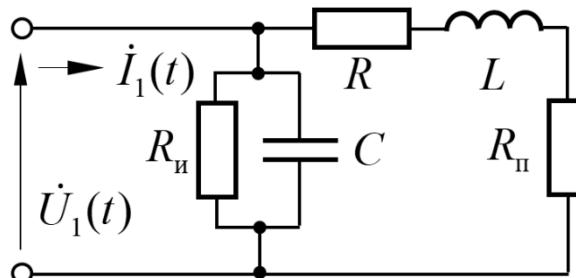


Рис.2 – Односторонние измерения при КЗ

$$(R + R_{ii})(\dot{I}_1(t) - C\dot{V}'_1(t)) + L(\dot{J}'_1(t) - C\dot{V}''_1(t)) = \dot{U}_1(t) \quad (2)$$

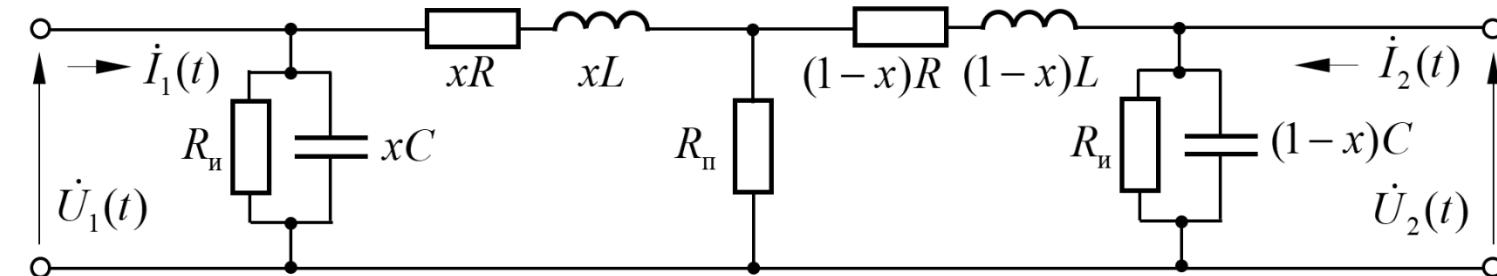


Рис.3 – Двухсторонние измерения при КЗ

$$x[R(\dot{I}_1(t) - xC\dot{V}'_1(t)) + L(\dot{J}'_1(t) - xC\dot{V}''_1(t))] - (1-x)[R(\dot{I}_2(t) - (1-x)C\dot{V}'_2(t)) + L(\dot{J}'_2(t) - (1-x)C\dot{V}''_2(t))] = \Delta\dot{U}(t) \quad (3)$$

Обозначения:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}(t) &= \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t), \\ \dot{X}'(t) &= \frac{d\dot{X}(t)}{dt}, \dot{X}''(t) = \frac{d^2\dot{X}(t)}{dt^2}, \\ \dot{V}'(t) &= \dot{U}'(t) + j\omega_0\dot{U}(t), \\ \dot{J}'(t) &= \dot{I}'(t) + j\omega_0\dot{I}(t), \\ \dot{V}''(t) &= \dot{U}''(t) + j2\omega_0\dot{U}'(t) - \omega_0^2\dot{U}(t), \\ \dot{J}''(t) &= \dot{I}''(t) + j2\omega_0\dot{I}'(t) - \omega_0^2\dot{I}(t). \end{aligned}$$

Применение:

- (1) → СМВЛ, оценка R, L, C ;
- (2) → Δ3-1 линии, ОМП;
- (3) → Δ3-2 линии, ОМП.



Защита и мониторинг состояния линии



1. Идентификация параметров линии

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

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

$$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}'_1(t) - C(\underline{k}\dot{U}''_1(t) + (1 + j\underline{k}\omega_0)\dot{U}'_1(t) + j\omega_0\dot{U}_1(t))} \quad (6)$$

$$\dot{K}(t) = \dot{I}_1(t) - C\dot{V}_1'(t), \dot{M}(t) = \dot{J}_1'(t) - C\dot{V}_1''(t)$$

$$\hat{R}(t) = \frac{\Delta \dot{U}_{\text{Im}}(t) \dot{M}_{\text{Re}}(t) - \Delta \dot{U}_{\text{Re}}(t) \dot{M}_{\text{Im}}(t)}{\dot{K}_{\text{Im}}(t) \dot{M}_{\text{Re}}(t) - \dot{K}_{\text{Re}}(t) \dot{M}_{\text{Im}}(t)}, \quad \hat{L}(t) = \frac{\Delta \dot{U}_{\text{Re}}(t)}{\dot{M}_{\text{Re}}(t)} - \hat{R}(t) \cdot \frac{\dot{K}_{\text{Re}}(t)}{\dot{M}_{\text{Re}}(t)} \quad (7)$$

2. Дистанционная защита на основе измерений синхровекторов:

$$\dot{\underline{z}}(t) = \frac{\dot{U}_p(t)}{\dot{I}_p(t)} \quad (8) \quad \dot{\underline{z}}(t) = \frac{\dot{U}_p(t)}{\dot{I}_p(t) + \underline{k} \dot{I}'_p(t)}$$

$$(9) \quad \hat{z}(t) = \frac{1}{k\omega_0} \text{Im} \left(\frac{\dot{U}_p(t)}{\dot{I}_p(t) + k\dot{I}'_p(t)} \right) \quad (10)$$

$$\hat{R}(t) = \frac{U_{\text{pRe}}(t) - \hat{L}(t) \left(I'_{\text{pRe}}(t) - \omega_0 \dot{I}_{\text{pIm}}(t) \right)}{I_{\text{pRe}}(t)}, \quad (11)$$

3. Применение двухсторонних (многосторонних) измерений синхровекторов:

$$\dot{\underline{z}}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{I}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)} \quad (12) \quad \dot{\underline{z}}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{I}_2(t) + L\dot{I}'_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t) + k(\dot{I}'_1(t) + \dot{I}'_2(t))} \quad (13)$$

$$\Delta \dot{V}(t) = \dot{V}_1(t) - \dot{V}_2(t), \dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t), \dot{J}(t) = \dot{J}_1(t) + \dot{J}_2(t)$$

$$\dot{K}(t) = -C(L\Delta\dot{V}''(t) + R\Delta\dot{V}'(t)), \quad \dot{M}(t) = R\dot{I}(t) + L\dot{J}'(t) - 2C(L\dot{V}_2''(t) + R\dot{V}_2'(t)).$$

$$\dot{N}(t) = C \left(L \dot{V}''(t) + R \dot{V}'_2(t) \right) - R \dot{I}_2(t) - L \dot{J}'_2(t) - \Delta \dot{U}(t).$$

$$\hat{z}(t) = \underline{z} \left(\frac{-\dot{M}(t) \pm \sqrt{\left(\dot{M}(t)\right)^2 - 4\dot{K}(t)\dot{N}(t)}}{2\dot{K}(t)} \right) \quad (14)$$



ЗАЩИТА И МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ

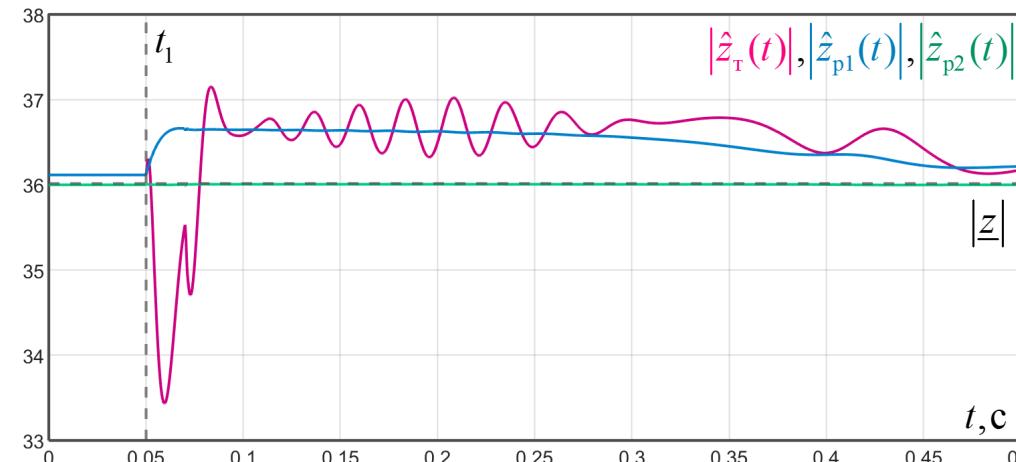


Рис.4 – Оценка \underline{z} при э/мех процессе в ЭЭС

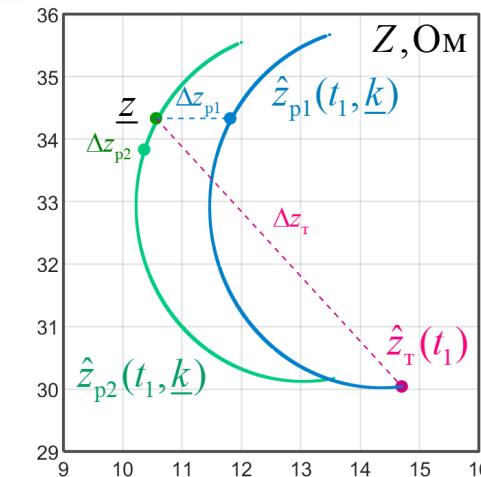


Рис.5 – Изменение k, \underline{C}

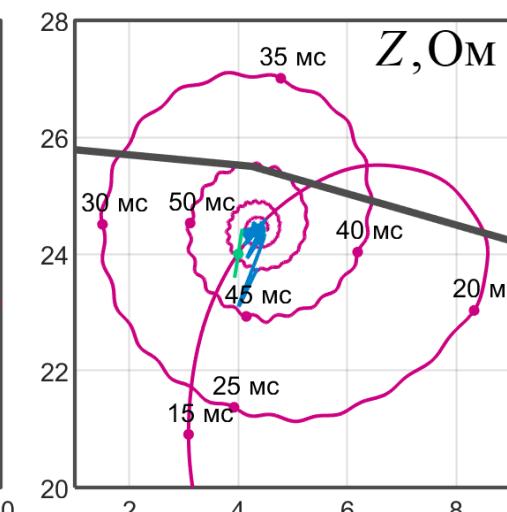
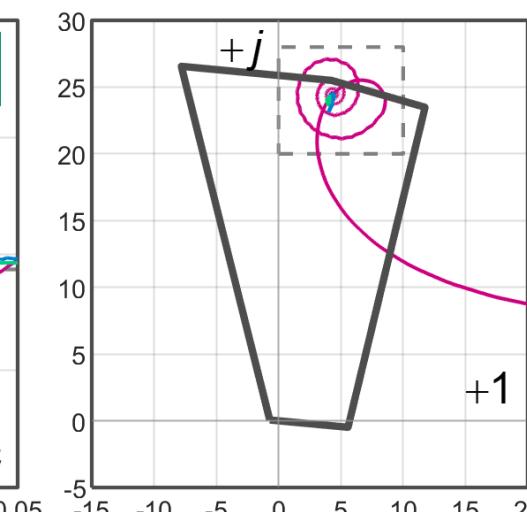
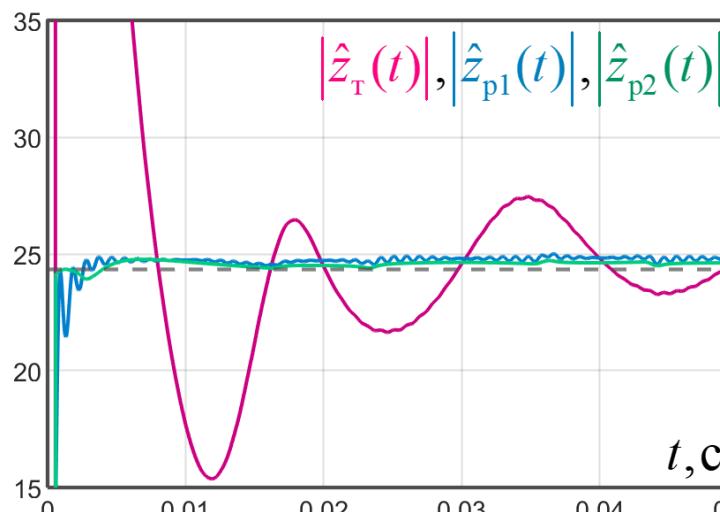


Рис.6 – Оценка сопротивления петли КЗ при наличии переходного сопротивления дуги



Защита и мониторинг состояния линии

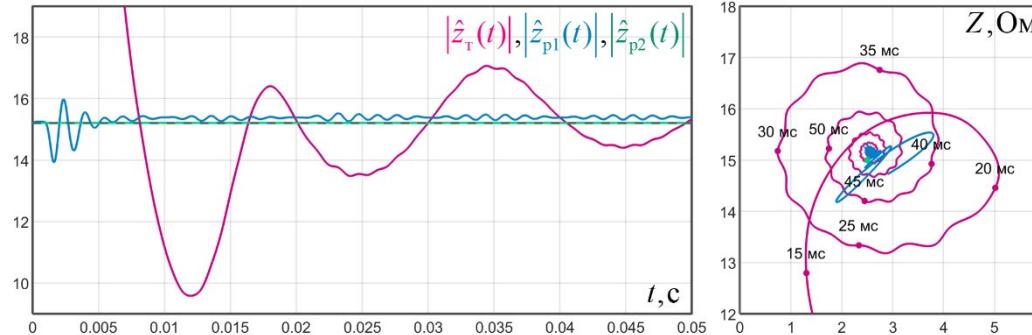


Рис.7 – Оценка сопротивления петли КЗ в линии по двухсторонним измерениям

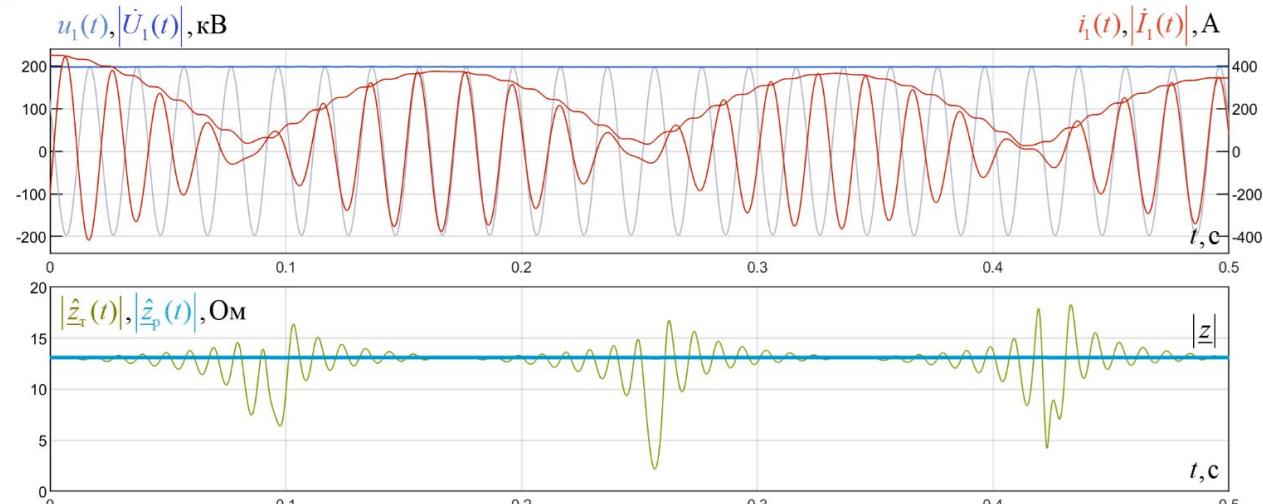


Рис.8 – Оценка \underline{z} при качаниях в ЭЭС

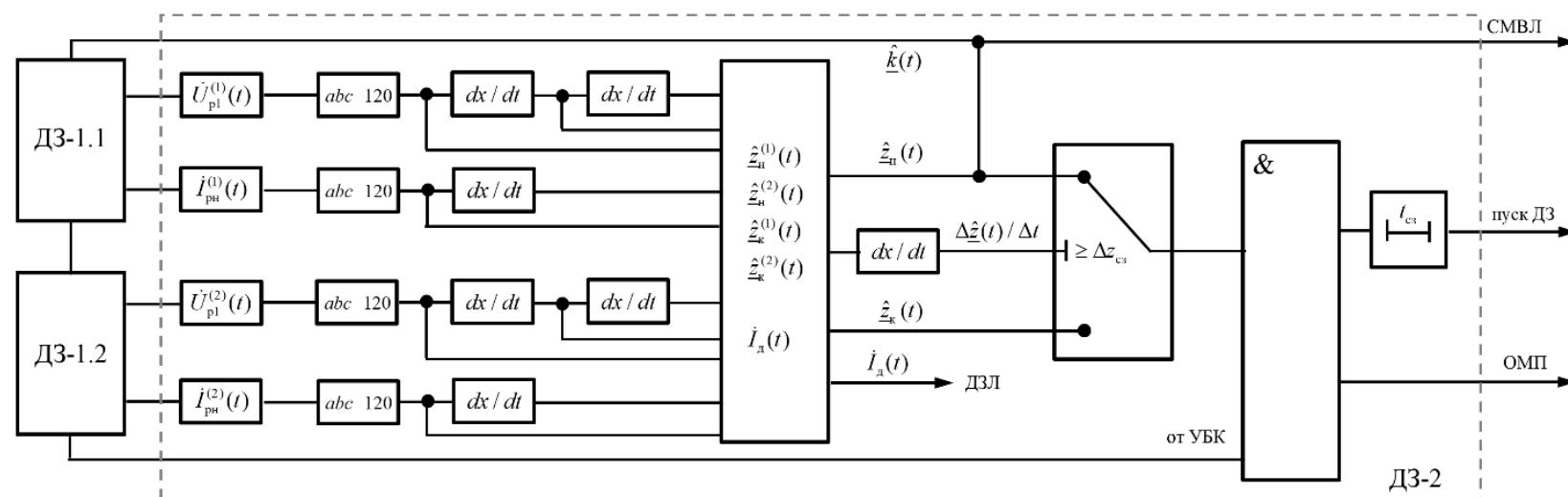


Рис.9 – Структурная схема Δ3 на основе измерений синхровекторов



Тестирование алгоритмов дистанционной защиты

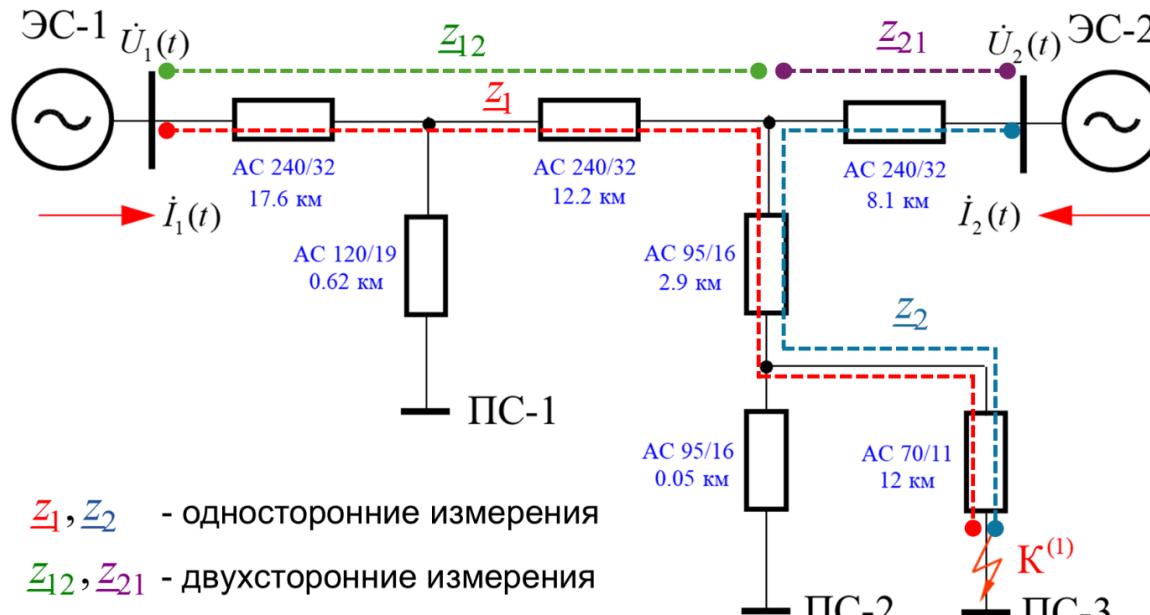


Рис.10 – Структурная схема сети (пример № 1)

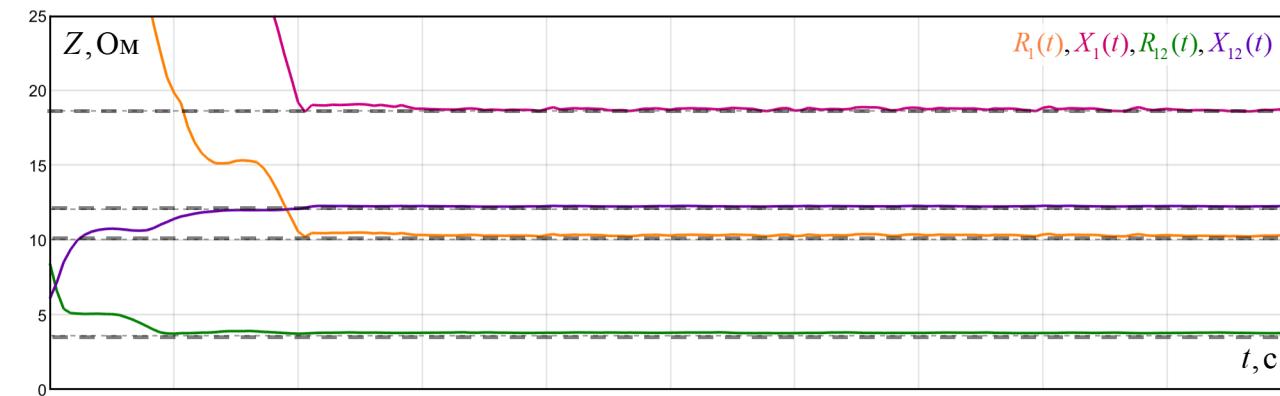


Рис.11 – Оценка сопротивления петли КЗ

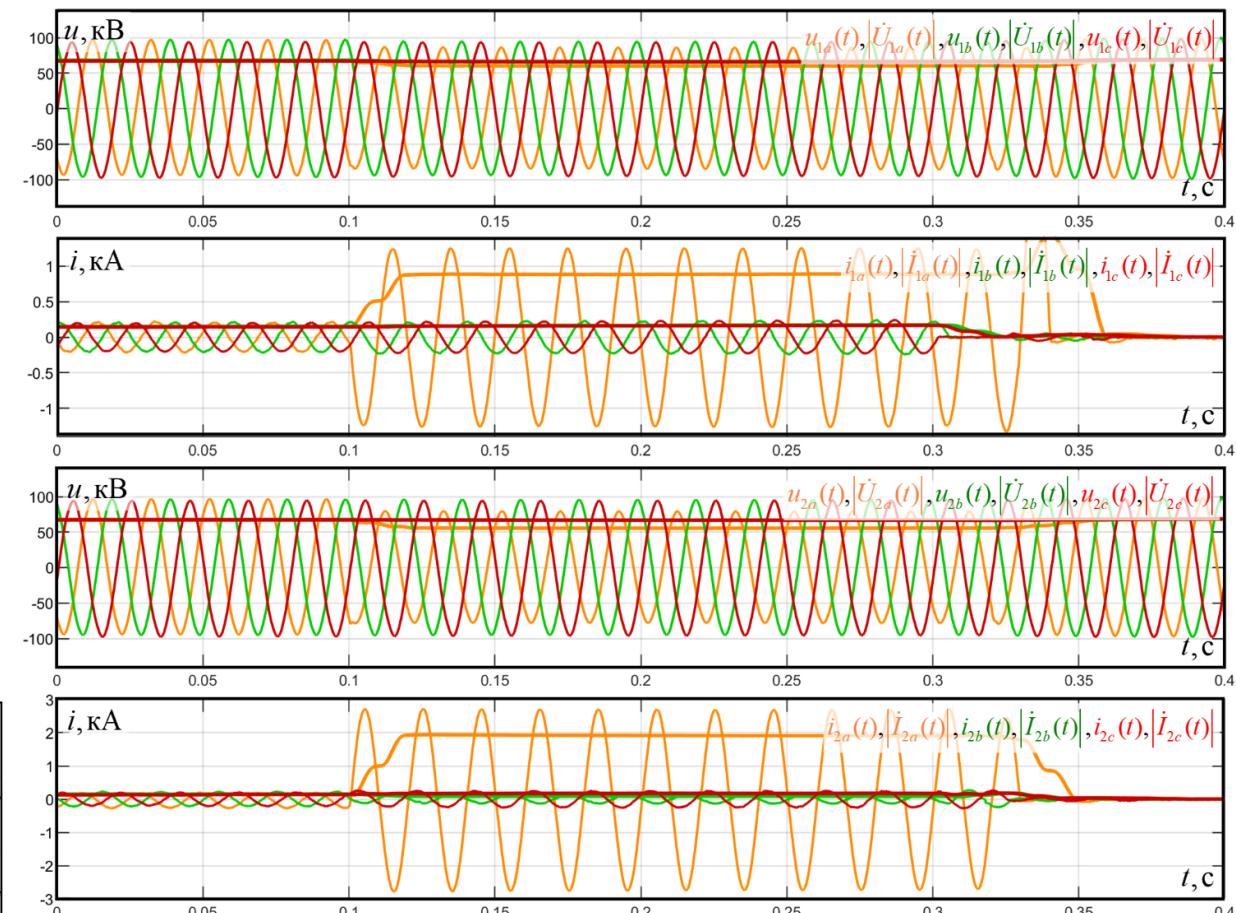


Рис.12 – Осциллографмы напряжений и токов

Пример 1: Однофазное КЗ в ВЛ 110 кВ



Тестирование алгоритмов дистанционной защиты

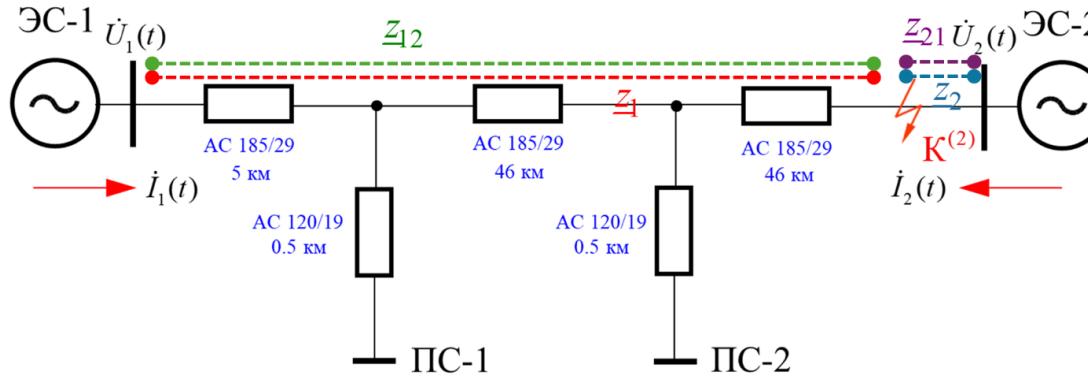


Рис.13 – Структурная схема сети (пример № 2)

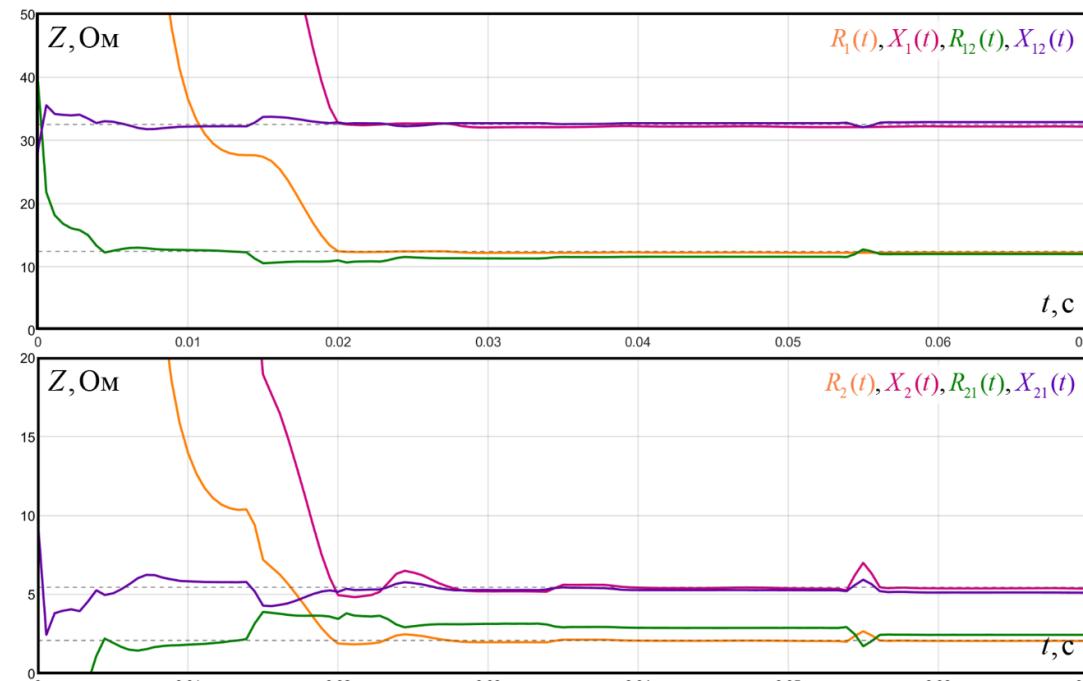


Рис.14 – Оценка сопротивления на основе СВИ

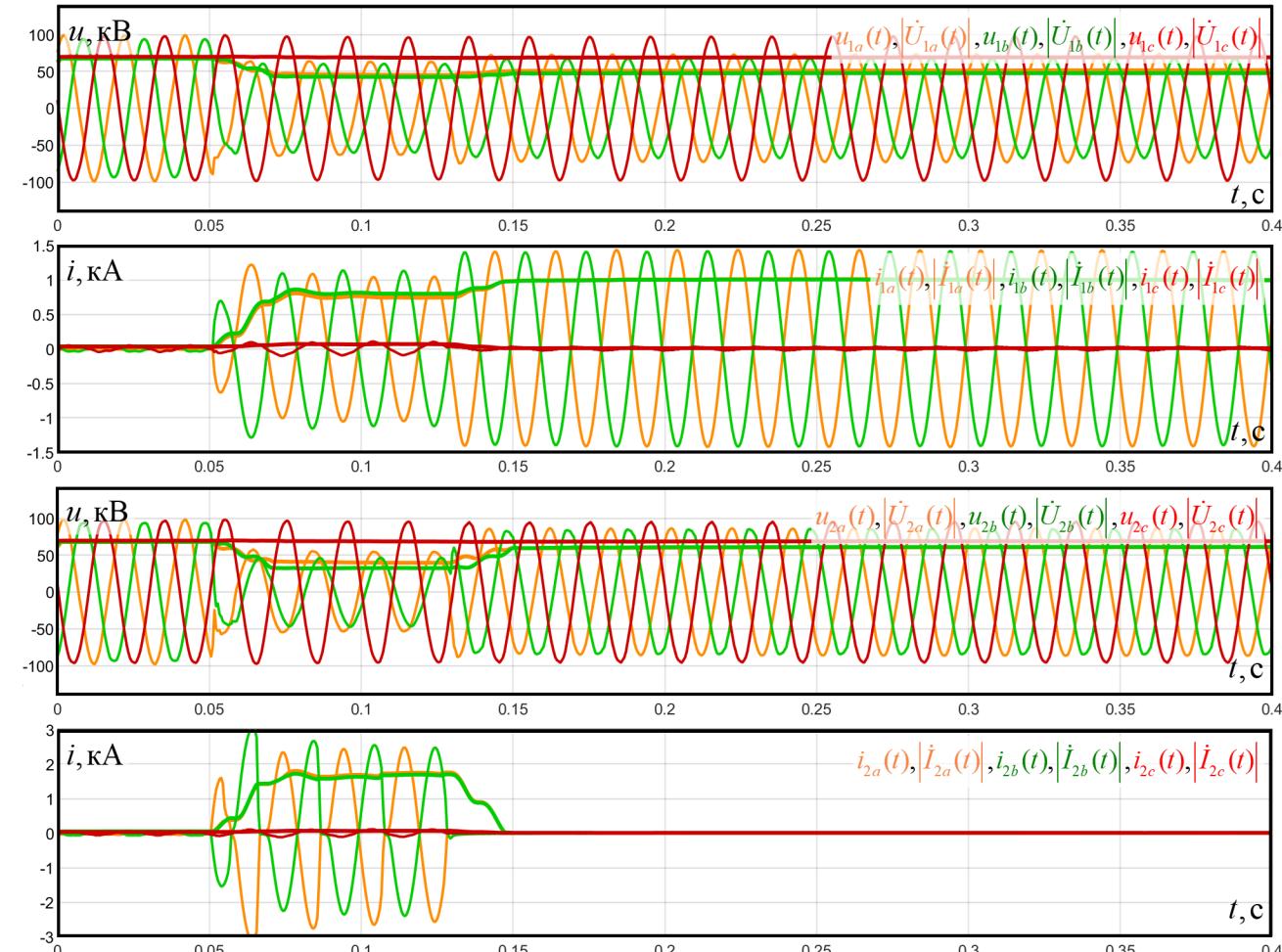


Рис.15 – Осциллографмы напряжений и токов

Пример 2: Двухфазное КЗ в ВЛ 110 кВ



ЗАЩИТА И МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

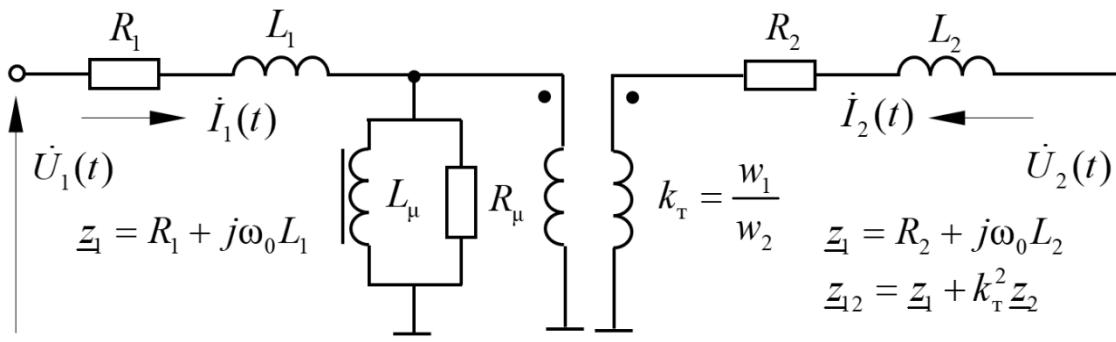


Рис.16 – Т-образная схема замещения СТ

Дифференциальное уравнение СТ в синхровекторах:

$$\dot{U}_1(t) - k_t \dot{U}_2(t) = \frac{1}{2} L_{12} \left(\dot{J}'_1(t) + \frac{1}{k_t} \dot{J}'_2(t) \right) + \frac{1}{2} R_{12} \left(\dot{I}_1(t) + \frac{1}{k_t} \dot{I}_2(t) \right) \quad (15)$$

Обозначения:

$$\begin{aligned} \underline{k} &= \frac{L_{12}}{Z_{12}}, \dot{X}'(t) = \frac{d\dot{X}(t)}{dt}, \dot{X}''(t) = \frac{d^2\dot{X}(t)}{dt^2}, \\ \dot{J}'(t) &= \dot{I}'(t) + j\omega_0 \dot{I}(t). \end{aligned} \quad (16)$$

Таблица 1 Применение алгоритмов на основе СВИ

Тип	Характеристика	Выражение
Мониторинг состояния СТ	- оценка параметров СТ в нормальном режиме (в т.ч. при внешних КЗ); - обеспечение функций системы мониторинга.	$\hat{Z}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - k_t \dot{U}_2(t)}{x(\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}'_1(t)) + (1-x)k_t^{-1}(\dot{I}_2(t) + \underline{k}\dot{I}'_2(t))}, \quad (17)$
Дифференциальный принцип защиты	- дифференциально-фазный принцип; - дополнительный критерий для блокировки защиты при БНТ; - снижение тока небаланса.	$ \dot{I}_d(t) = \dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}'_1(t) - k_t^{-1}(\dot{I}_2(t) + \underline{k}\dot{I}'_2(t)),$ $\varphi_d(t) = \arg\left(\frac{\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}'_1(t)}{\dot{I}_2(t) + \underline{k}\dot{I}'_2(t)}\right), \hat{L}_\mu(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \underline{z}_1 \dot{I}_1(t) + L_1 \dot{I}'_1(t)}{\dot{J}_1(t) + k_t^{-1} \dot{J}_2(t)} \quad (18)$
Дистанционный принцип защиты	- оценка сопротивления при внутреннем КЗ; - высокое быстродействие и точность при э/м процессах.	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - k_t \dot{U}_2(t) + k_t^{-1} \underline{z}_{12} (\dot{I}_2(t) + \underline{k}\dot{I}'_2(t))}{\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}'_1(t) + k_t^{-1}(\dot{I}_2(t) + \underline{k}\dot{I}'_2(t))} \quad (19)$



ЗАЩИТА И МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

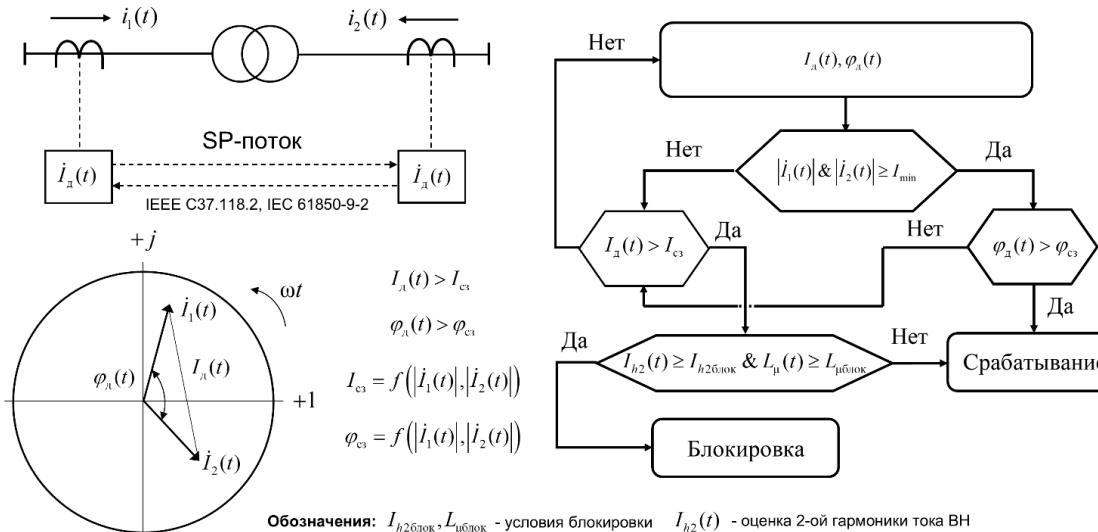


Рис.17 – Структурная схема защиты СТ

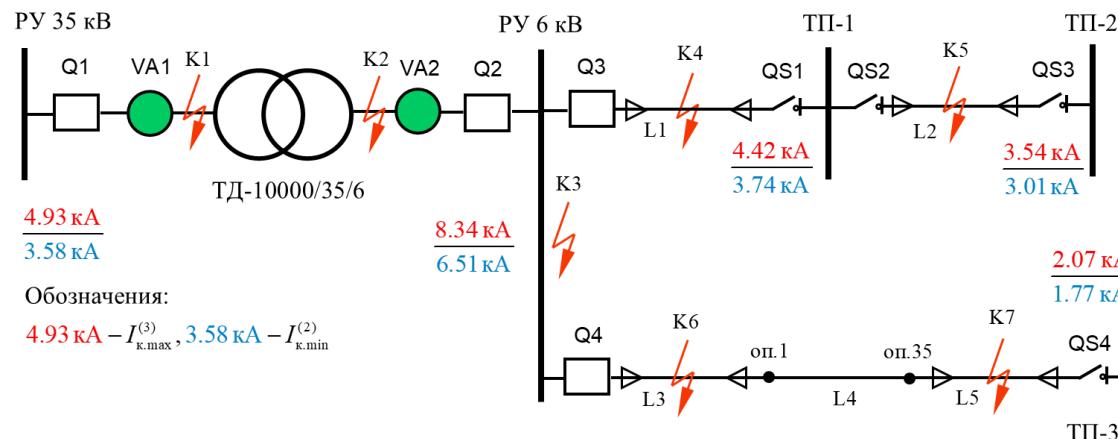


Рис.18 – Структурная схема модели

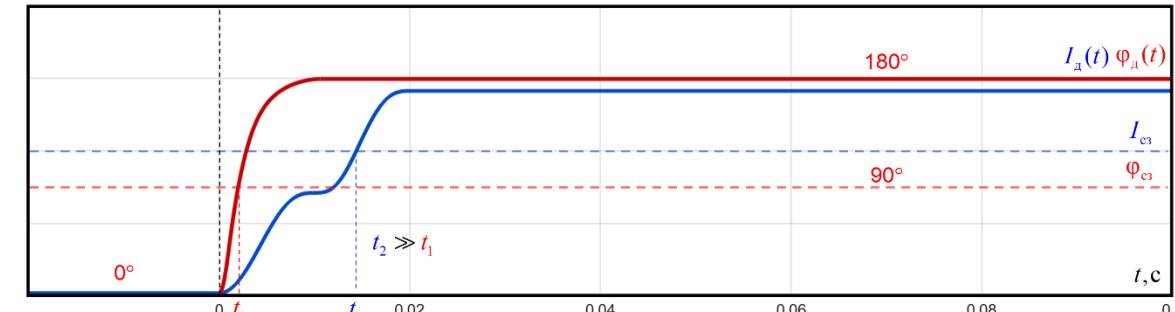


Рис.19 – Оценка модуля и фазы дифференциального тока

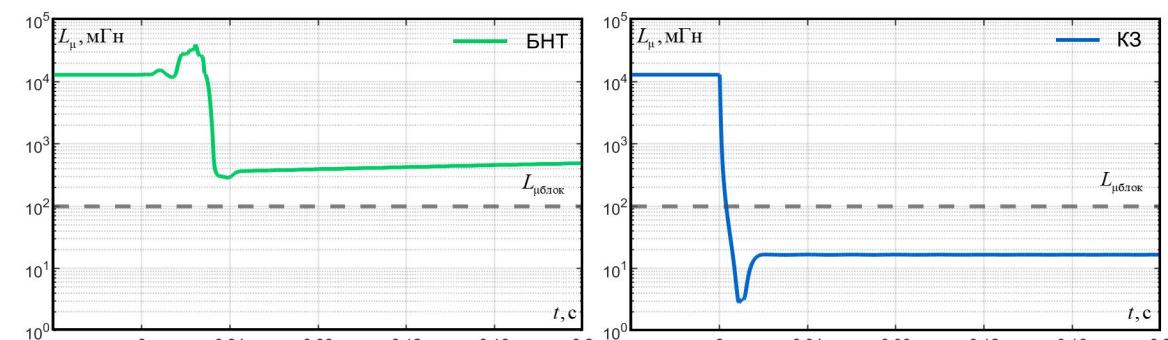
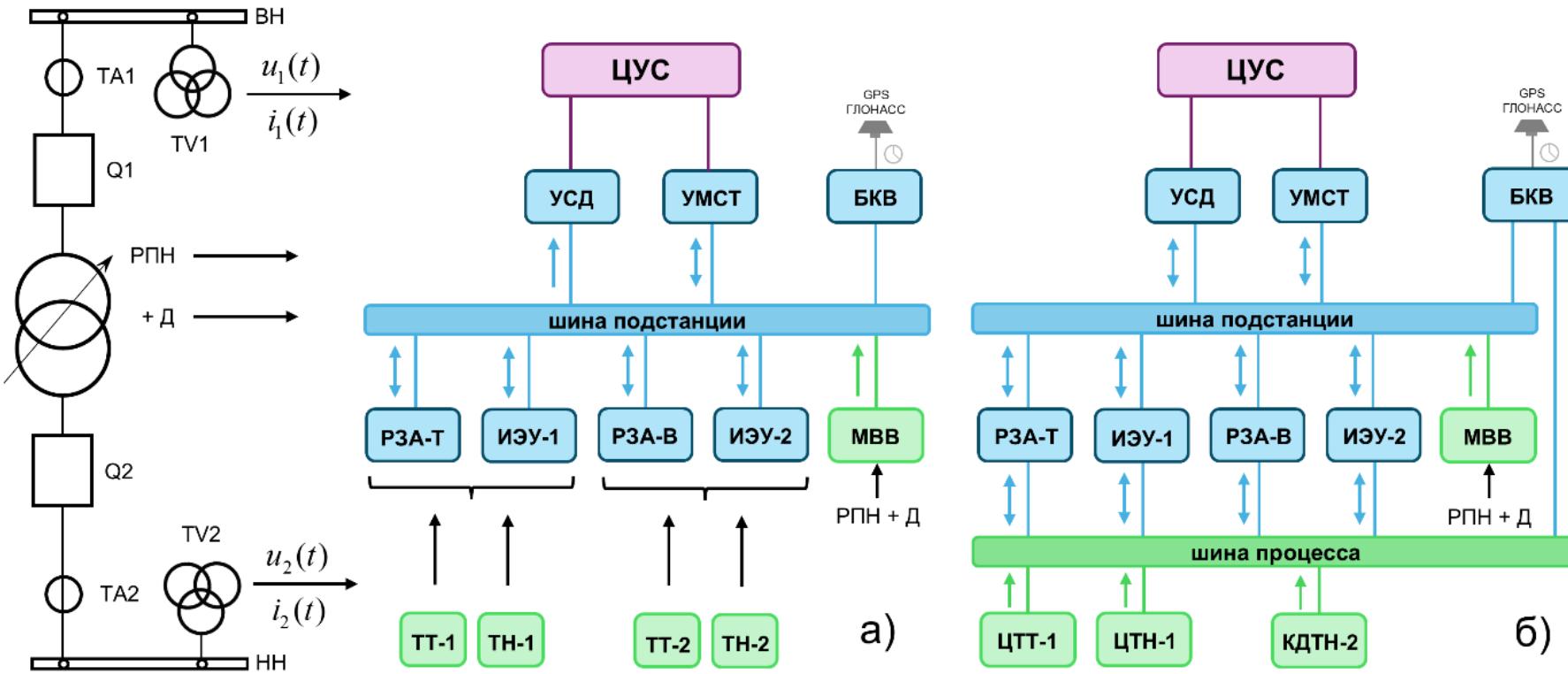


Рис.20 – Оценка индуктивности намагничивания



ЗАЩИТА И МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА



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



Рис.21 – АВТОМАТИЗАЦИЯ ЦЕНТРОВ ПИТАНИЯ РС на основе СВИ



ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

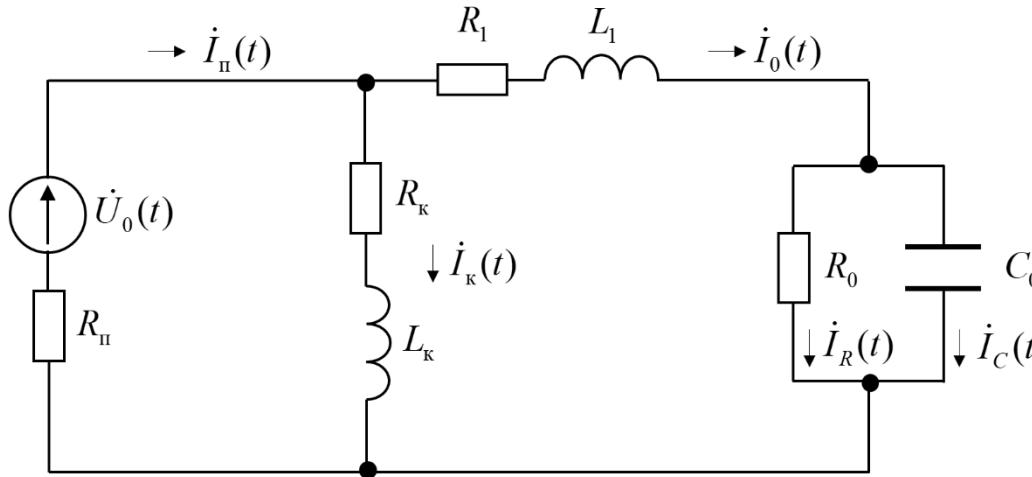


Рис.22 – Схема замещения контура НП

$$\begin{cases} (R_n + R_1)\dot{I}_0(t) + L_1\dot{J}'_0(t) + \dot{U}_C(t) = \dot{U}_0(t) \\ C_0\dot{V}'_C(t) + \frac{1}{R_0}\dot{U}_C(t) = \dot{I}_0(t) \end{cases}$$

(20) → для сети без ΔГР

$$\begin{cases} L_1\dot{J}'_1(t) + R_1\dot{I}_0(t) + \dot{U}_C(t) + R_n(\dot{I}_0(t) + \dot{I}_k(t)) = \dot{U}_0(t) \\ L_k\dot{J}'_k(t) + R_k\dot{I}_k(t) + R_n(\dot{I}_0(t) + \dot{I}_k(t)) = \dot{U}_0(t) \\ C_0\dot{V}'_C(t) + \frac{1}{R_0}\dot{U}_C(t) = \dot{I}_0(t) \end{cases}$$

(21) → с учетом ΔГР

Таблица 6 Варианты оценки ёмкости фидера при ОЗЗ

Тип	Характеристика	Выражение
Традиционный способ	- изолированная нейтраль; - установившийся режим ОЗЗ;	$\hat{C}_0(t) = \text{Im} \left(\frac{\dot{I}_0(t)}{\omega_0 \dot{U}_0(t)} \right)$ (22)
Разработанный способ	- изолированная нейтраль; - установившийся и переходный режим ОЗЗ;	$\hat{C}_0(t) = \frac{\dot{I}_0(t) - G_0(\dot{U}_0(t) - R_1\dot{I}_0(t) - L_1\dot{J}'_0(t))}{\dot{V}'_0(t) - L_1\dot{J}''_0(t) - (R_1 + R_n)\dot{J}'_0(t)}, G_0 = \frac{1}{R_0}$ (23)
	- изолированная или компенсированная нейтраль; - установившийся и переходный режим ОЗЗ; - эквивалентные синхровекторы гармоник.	$\hat{C}_0(t) = \frac{\sum_{n=1}^{N_{\max}} (\dot{I}_{0m}(t) - G_0(\dot{U}_{0m}(t) - R_1\dot{I}_{0m}(t) - L_1\dot{J}'_{0m}(t)))}{\sum_{n=1}^{N_{\max}} (\dot{V}'_0(t) - L_1\dot{J}''_0(t) - (R_1 + R_n)\dot{J}'_{0m}(t))}, m = 2n + 1$ (24)



Тестирование алгоритмов защиты от ОЗЗ

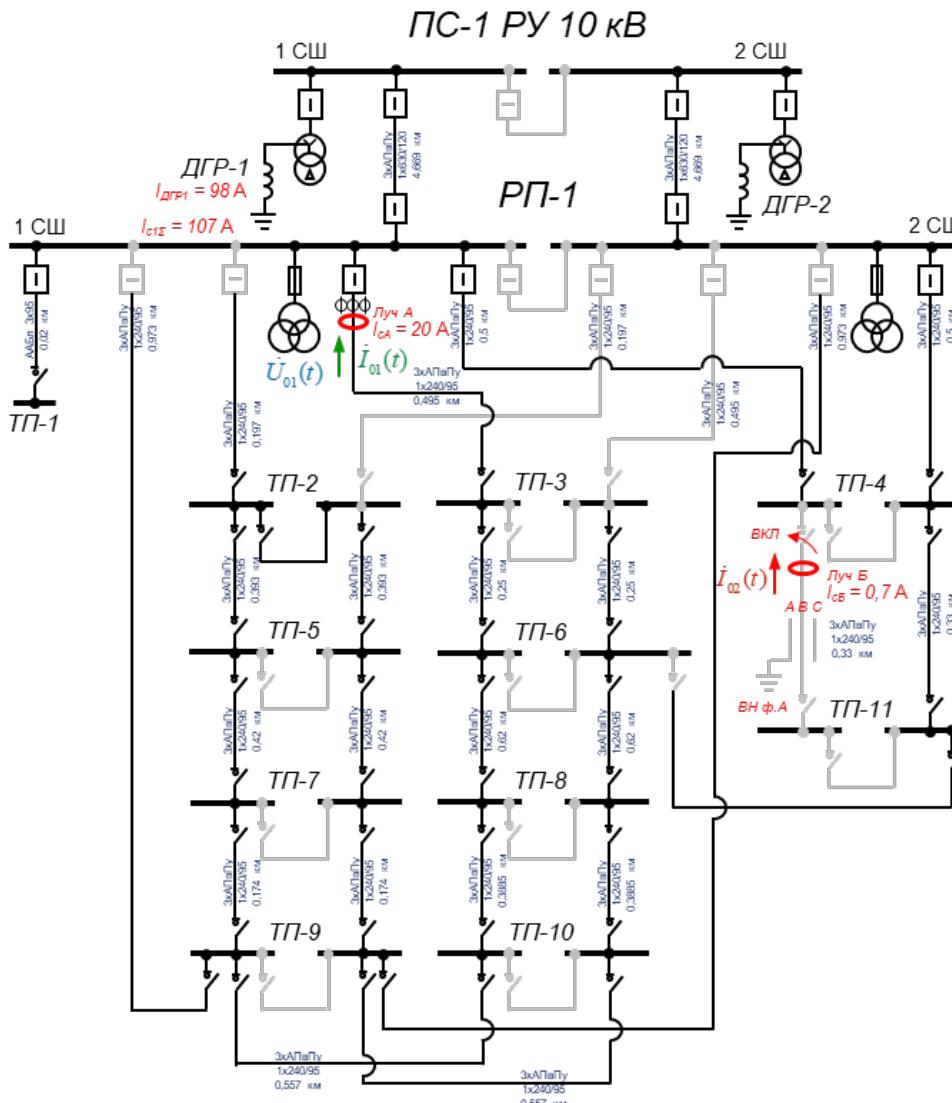


Рис.23 – Структурная схема сети (пример № 3)

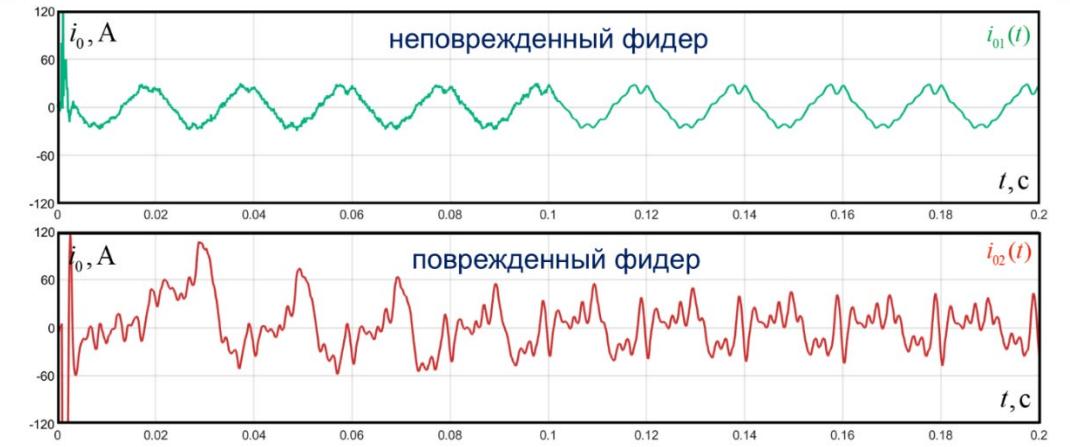


Рис.24 – Осциллографмы токов НП

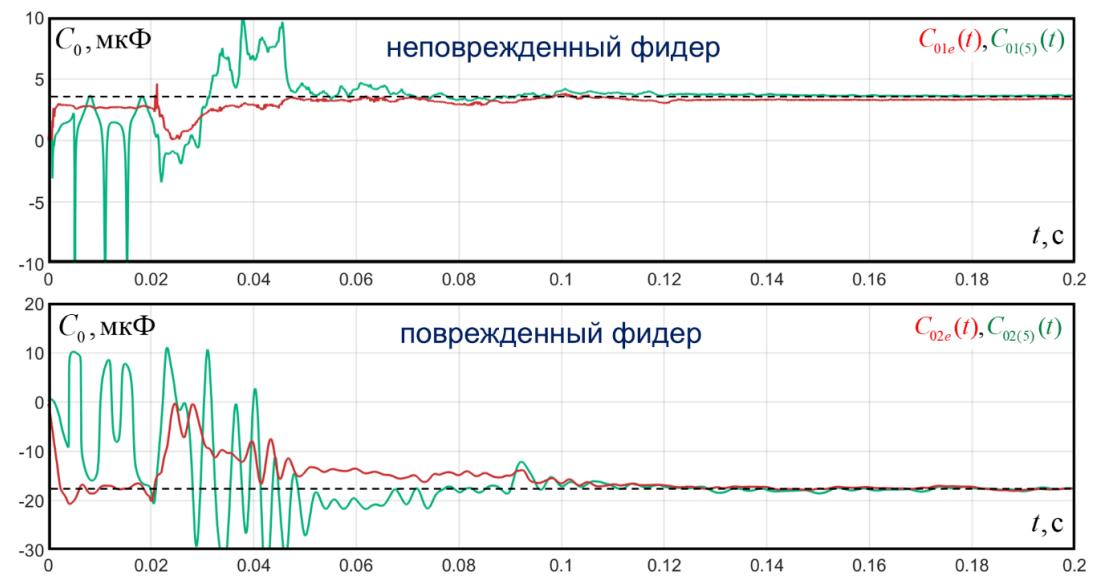


Рис.25 – Оценка емкости фидеров



Внедрение



- НИР по разработке системы мониторинга СТ на основе СВИ;
 - патент на изобретение «Способ мониторинга состояния СТ»;
 - ОПЭ АСМД на подстанциях 35-110 кВ ПС-7, ПС-8 (Архэнерго);
 - АСМД в составе комплекса РЗА и АСУ ТП в рамках НИОКР по исследованию цифровых оптических и электронных ТТ и ТН;
 - ОПЭ на подстанции 220 кВ (Калугаэнерго).

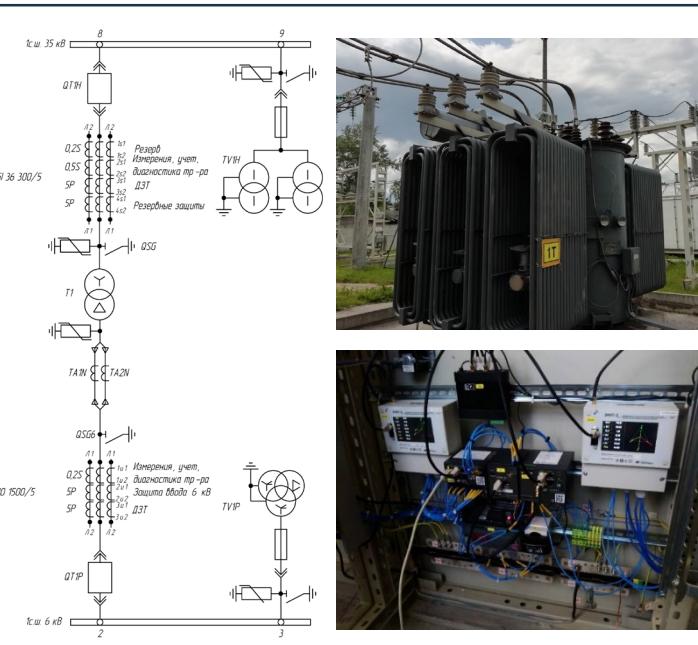


Рис.26 – ОПЭ ПС 35/6 кВ

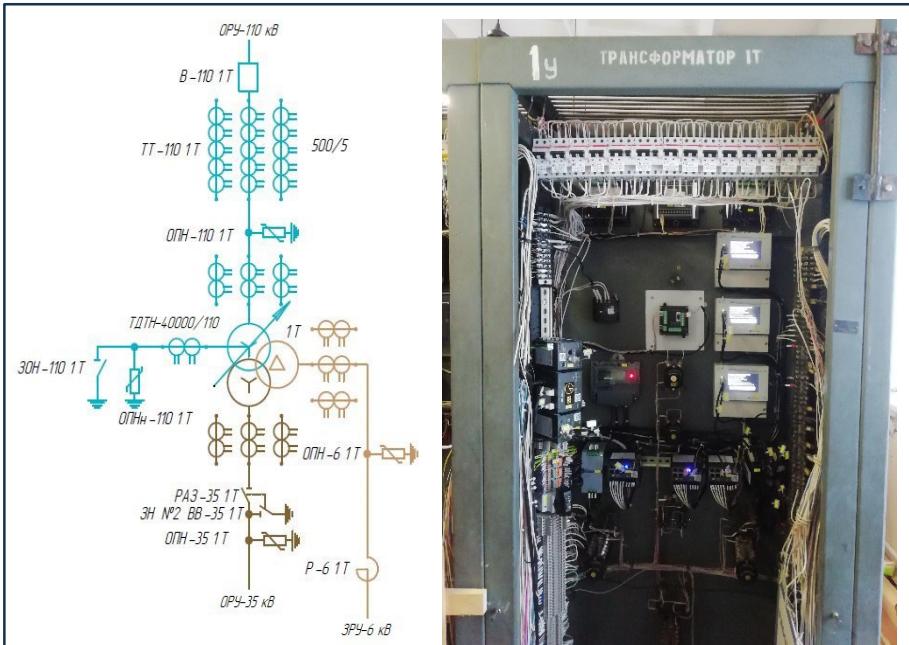


Рис.27 – ОПЭ ПС 110/35/6 кВ



Рис.28 – НИР СМСТ, патент

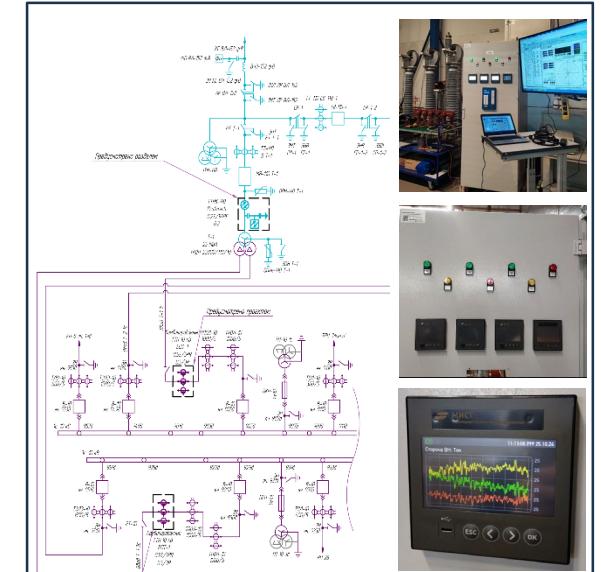


Рис.29 – НИОКР



Цифровые измерительные ТТ и ТН + СВИ

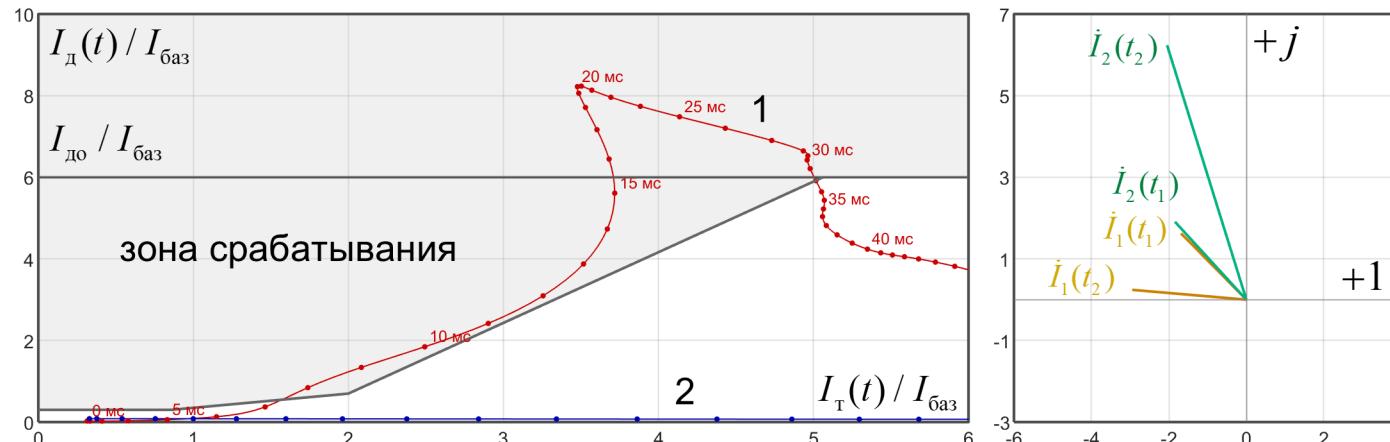


Рис.30 – Хар-ка срабатывания ДЗТ при внешнем КЗ:
1 – электромагнитный ТТ, 2 – цифровой ТТ

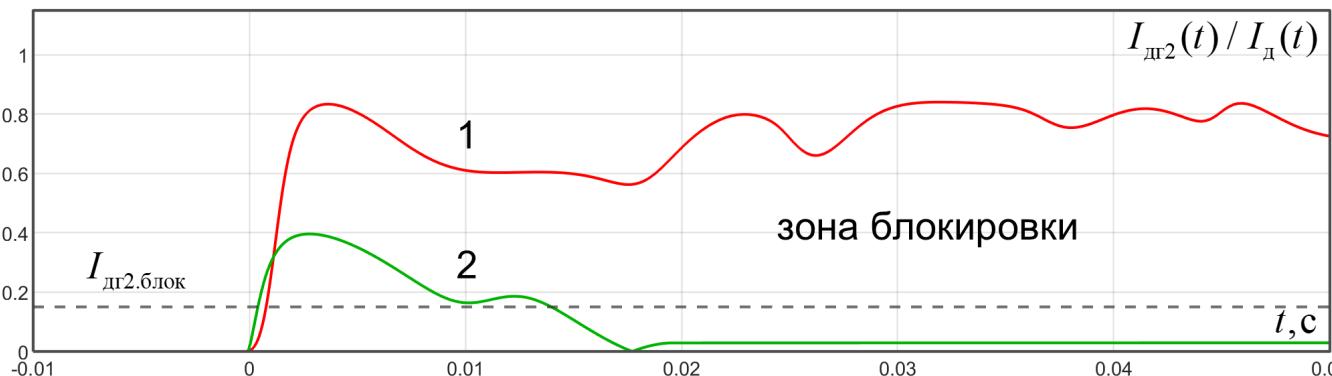


Рис.31 – Оценка 2-ой гармоники тока СТ при КЗ ВН:
1 – электромагнитный ТТ, 2 – цифровой ТТ

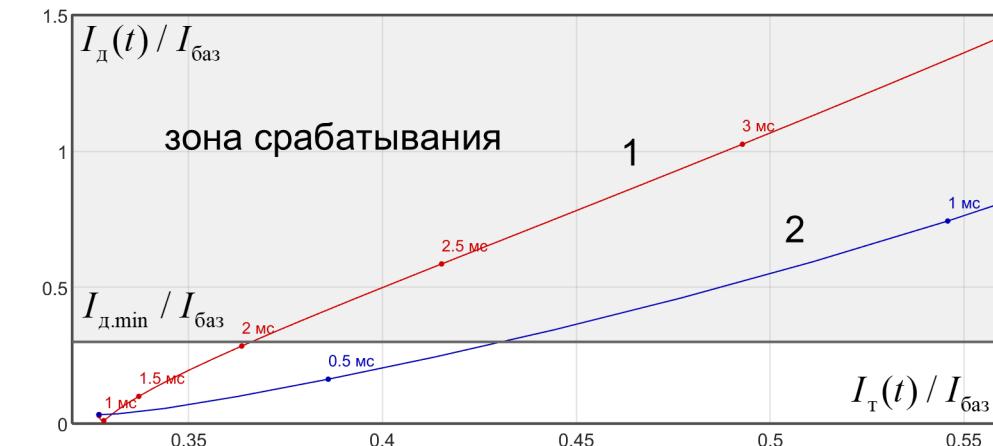


Рис.32 – Хар-ка ДЗТ при КЗ ВН:
1 – электромагнитный ТТ, 2 – цифровой ТТ

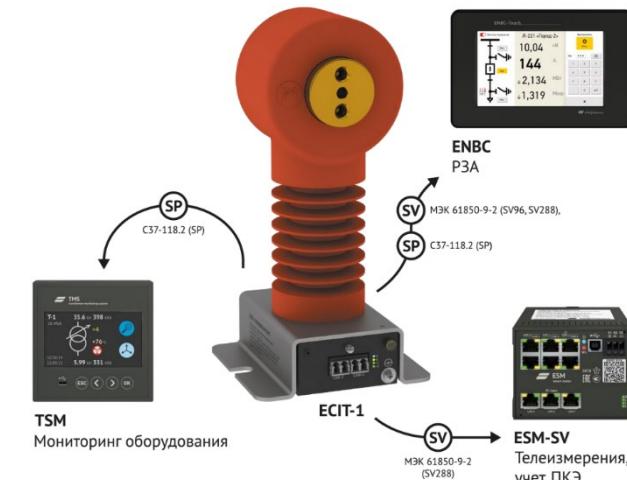


Рис.33 – Комбинированный цифровой измерительный трансформатор ECIT



Заключение



- разработаны усовершенствованные алгоритмы защиты линии на основе измерений синхровекторов напряжения и тока;
- проведено математическое и физическое моделирование различных аварийных процессов в линии, в т.ч. при изменении параметров линии и при наличии Э/м и Э/мех переходных процессов в энергосистеме;
- выполнен анализ работы предложенных алгоритмов защиты на основе СВИ по данным осцилограмм реальных аварийных событий;
- алгоритмы защиты от ОЗЗ на основе измерений синхровекторов напряжения и тока НП реализованы в устройстве локализации повреждений (ЭНЛЗ);
- разработаны алгоритмы защиты и мониторинга состояния СТ на основе СВИ;
- проведено виртуальное и физическое моделирование работы алгоритмов защиты и мониторинга СТ на основе измерений синхровекторов напряжения и тока;
- осуществлено внедрение в производство устройства мониторинга СТ (МИСТ);
- проводится опытно-промышленная эксплуатация АСМД на основе СВИ.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

s.piskunov@ens.ru, +7-911-583-91-02



Применение и развитие технологии СВИ для совершенствования систем автоматизации распределительных сетей

С.А. Пискунов^{1,2}, А.В. Мокеев^{1,2}, Д.Н. Ульянов^{1,2}

¹ООО «Инженерный центр «Энергосервис», ²Северный (Арктический)
федеральный университет
Россия
s.piskunov@ens.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

распределительная сеть, синхровектор, релейная защита, система автоматизации, однофазное замыкание на землю, система мониторинга

ВВЕДЕНИЕ

Технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) в настоящее время нашла широкое применение в задачах повышения эффективности и обеспечения новых возможностей систем управления и мониторинга электроэнергетических систем [1-2]. В то же время, можно отметить, что применение СВИ для целей совершенствования систем автоматизации распределительных сетей также является актуальной темой для научных исследований в связи с усложнением их структуры, использованием возобновляемых источников энергии, развитием сетей с распределенной генерацией и др. [3].

Для обеспечения возможностей применения СВИ в распределительных сетях необходимо выполнение ряда условий. В первую очередь, это развитие технологии СВИ, ее нормативно-технической базы для целей релейной защиты и автоматики (РЗА). Существующие традиционные устройства СВИ (УСВИ) ориентированы на применение в системах мониторинга переходных режимов [1] и не могут напрямую быть использованы в релейной защите. В связи с этим актуальными вопросами являются разработка новых интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) с поддержкой СВИ и совершенствование принципов передачи данных СВИ для целей РЗА. Во-вторых, особенности работы распределительных сетей, принципы их построения обуславливают необходимость поиска и разработки новых алгоритмов защиты, автоматики и мониторинга на основе измерений синхровекторов напряжения и тока, совершенствования принципов их цифровой обработки, анализа синхровекторов переходных процессов [4-7].

Согласно существующей концепции развития систем автоматизации электрических сетей [8] планируется более широкое применение высокоавтоматизированных подстанций (ВАПС) 2 и 3 архитектуры, в том числе в распределительных сетях. Тем не менее, применение ВАПС в сетях среднего напряжения существенно ограничено в связи с высокой стоимостью оборудования, сложностью организации каналов передачи данных отдельных систем автоматизации, большим объемом передаваемых данных в виде SV-потоков. Исследования показывают, что применение и развитие технологии СВИ, ее интеграция в структуру ВАПС позволяют решить ряд вопросов, связанных с применением ВАПС в распределительных сетях [5].

В предыдущих работах авторов были изложены основные принципы, касающиеся применения технологии СВИ в сетях среднего напряжения, развития ее теории, анализа синхровекторов переходных процессов, практических вопросов применения СВИ в



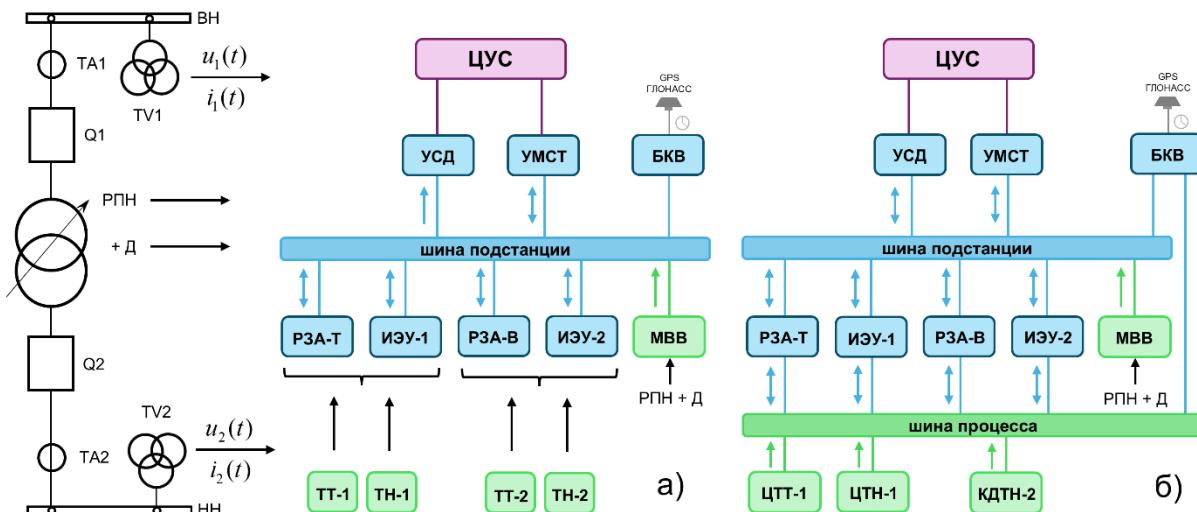
распределительных сетях [4-7]. Настоящий доклад является продолжением проведенных исследований и раскрывает отдельные вопросы, связанные с совершенствованием систем автоматизации распределительных сетей на основе технологии СВИ.

В докладе представлены общие принципы анализа синхровекторов переходных процессов, которые позволяют разрабатывать эффективные алгоритмы систем защиты, автоматики, мониторинга и управления на основе технологии СВИ. Рассмотрены возможности для интеграции технологий ВАПС и СВИ в распределительных устройствах среднего напряжения. Приведены разработанные алгоритмы систем защиты и мониторинга распределительных сетей на основе СВИ. Наиболее важными из рассматриваемых вопросов являются совершенствование дистанционной и дифференциальной защиты силового трансформатора и линии, защиты от ОЗЗ, а также разработка систем мониторинга силовых трансформаторов. В докладе представлено теоретическое обоснование для разработанных алгоритмов, результаты их апробации на моделируемых и реальных данных осциллографов различных событий, а также приведен опыт применения данных алгоритмов в производимых устройствах с поддержкой СВИ на реальных действующих объектах.

ЗАЩИТА И МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Системы автоматизации подстанции, как правило, реализуются на базе отдельных программно-технических комплексов и имеют раздельные каналы передачи данных. Это существенно увеличивает стоимость создания ВАПС и сокращает область их применения в распределительных сетях. Применение технологии СВИ и ее интеграция в ВАПС позволяет обеспечить реализацию систем автоматизации ПС на основе единой структуры, сократить объемы передаваемых данных и расширить область применения ВАПС с сетях среднего напряжения [5].

В качестве примера рассмотрим структурную схему автоматизации ПС (рис.1).



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

Рис. 1: Структурная схема автоматизации понизительной подстанции:
а) модернизируемые объекты, б) вновь строящиеся объекты

Модернизация существующих ПС наиболее целесообразна на основе архитектуры ВАПС второго типа (рис.1, а). Для этого варианта предполагается постепенное расширение функциональных возможностей систем автоматизации. Для вновь строящихся ПС наиболее предпочтительным является архитектура ВАПС третьего или четвертого типа (рис.1, б). Этот вариант предполагает максимальное использование преимуществ технологий ВАПС и СВИ [5].



Единая структура систем автоматизации ПС обеспечивается за счет принципа применения двух многофункциональных ИЭУ (РЗА и измерительного ИЭУ) на одно присоединение ПС. Интеграция данных от устройств РЗА и ИЭУ с поддержкой СВИ позволяет шире использовать дифференциальные и дистанционные принципы защиты, реализовать эффективную систему мониторинга состояния силового трансформатора на основе контроля его электромагнитных параметров [4-7].

Первый вариант схемы автоматизации ПС (рис.1, а) предполагает применение традиционных электромагнитных трансформаторов напряжения и тока (ТН, ТТ). Второй вариант основан на применение цифровых ТТ и ТН с поддержкой передачи потоков синхровекторов напряжения и тока, что позволяет шире применять новые алгоритмы РЗА в распределительных сетях, исключить негативные эффекты насыщения и остаточной намагниченности ТТ, снизить стоимость комплекта измерительного оборудования, в особенности для комбинированных цифровых ТТ и ТН [9].

Рассмотрим подробнее принципы построения систем защиты и мониторинга состояния силового трансформатора (СТ) на основе применения СВИ. На рис.2 приведена схема замещения двухобмоточного СТ с обозначением его основных параметров.

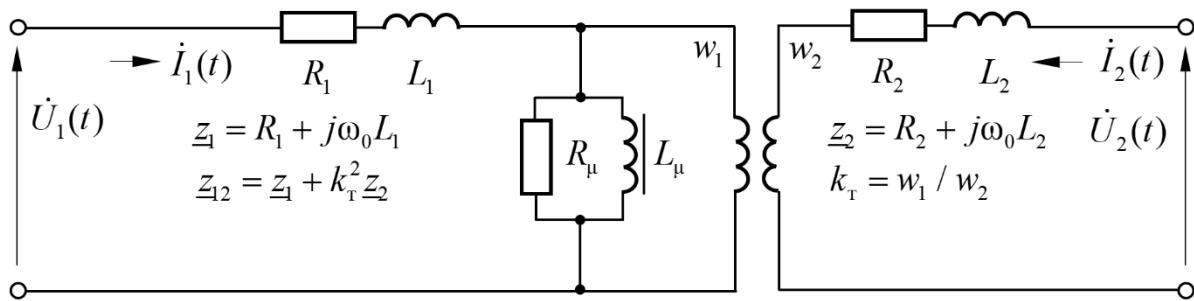


Рис. 2: Т-образная схема замещения силового трансформатора

Результаты проведенных исследований показывают, что оценка параметров продольной ветви (R_1, L_1, R_2, L_2) и поперечной ветви (R_μ, L_μ) может применяться для совершенствования дифференциальной и дистанционной защиты СТ [5]. Для этой цели, путем преобразования исходной системы дифференциальных уравнений модели СТ, представленной мгновенными значениями токов и напряжений, к форме, в которой фигурируют соответствующие им синхровекторы процесса [10], получены выражения для оценки модуля и фазы дифференциального тока трансформатора:

$$I_d(t) = \left| \dot{I}_1(t) + \underline{k} \dot{I}'_1(t) - k_t^{-1} (\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t)) \right|, \quad \varphi_d(t) = \arg \left(\frac{\dot{I}_1(t) + \underline{k} \dot{I}'_1(t)}{\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t)} \right), \quad (1)$$

сопротивления трансформатора в нормальном режиме (при внешнем КЗ):

$$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - k_t \dot{U}_2(t)}{x(\dot{I}_1(t) + \underline{k} \dot{I}'_1(t)) + (1-x)k_t^{-1}(\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t))}, \quad (2)$$

и сопротивления петли КЗ в трансформаторе:

$$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - k_t \dot{U}_2(t) + k_t^{-1} z_{12} (\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t))}{\dot{I}_1(t) + \underline{k} \dot{I}'_1(t) + k_t^{-1} (\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t))}, \quad (3)$$

где $\underline{k} = L_{12} / z_{12}$ – коэффициент, характеризующий сопротивление обмоток СТ;

k_t – коэффициент трансформации, $x = z_{1H} / z_{12H}$.

Предлагаемый подход (1) – (3) на основе измерений синхровекторов напряжения и тока СТ в совокупности с применением цифровых измерительных ТТ и ТН позволяет



улучшить характеристики работы дифференциальной защиты трансформатора и производить точную оценку параметров СТ, в том числе в различных переходных режимах в энергосистеме. В качестве примера рассмотрим моделирование работы дифференциальной защиты при внешнем КЗ и при внутреннем повреждении СТ.

На рис.3 приведен пример моделирования внешнего КЗ за трансформатором.

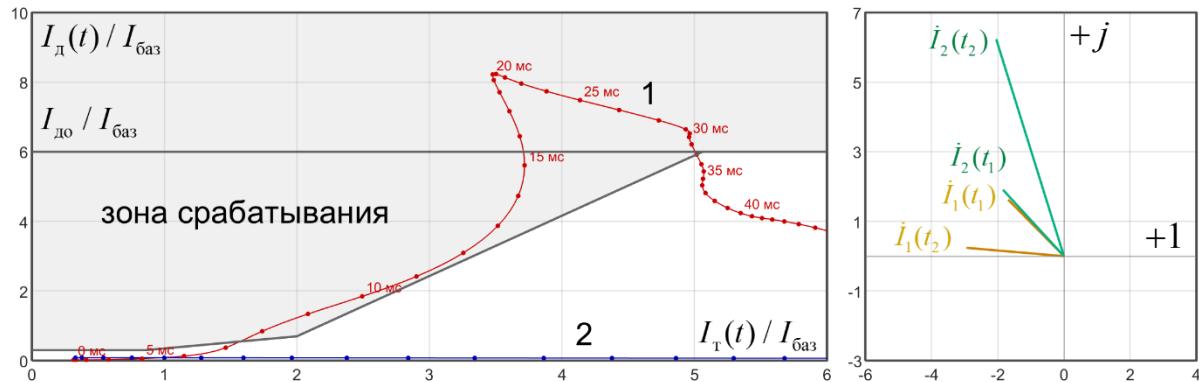


Рис. 3: Моделирование режима внешнего КЗ за трансформатором: 1 – электромагнитные ТТ, 2 – цифровые ТТ на основе катушки Роговского

В виртуальной среде Simulink моделируется работа понижающего СТ 35/6 кВ 10 МВА. На графиках (рис.3) представлена характеристика срабатывания дифференциальной защиты СТ, зависимость дифференциального тока $I_d(t)$ от тормозного тока $I_T(t)$ при внешнем КЗ, а также векторная диаграмма синхровекторов тока СТ в моменты времени $t_1 = 5$ мс и $t_2 = 15$ мс от начала короткого замыкания. На графике слева красной линией (1) представлена зависимость для электромагнитных ТТ, синей линией (2) – для цифровых ТТ на основе катушки Роговского, без эффекта насыщения.

Результаты моделирования показывают, что в определенном сочетании не однотипных ТТ и апериодической составляющей тока КЗ возможно попадание в зону срабатывания защиты из-за неодинаковой степени насыщения ТТ (характеристика 1). В то же время контроль фаз синхровекторов тока СТ позволяет идентифицировать режим внешнего КЗ. Кроме того, при применении цифровых ТТ (характеристика 2) дифференциальный ток СТ, оцениваемый по выражению (1), не превышает 0,1 о.е., таким образом, неселективное действие защиты в данном случае исключается.

На рис.4 приведен пример моделирования КЗ в обмотке ВН трансформатора.

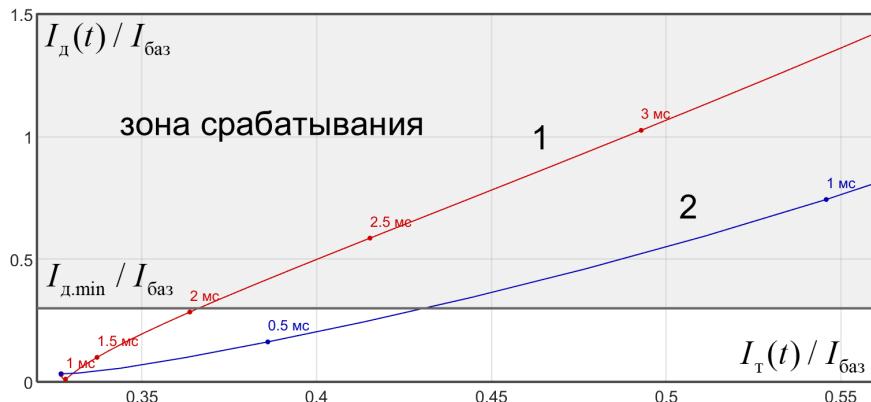


Рис. 4: Моделирование режима КЗ в обмотке ВН СТ: 1 – традиционный способ оценки дифференциального тока, 2 – на основе выражения (1)

В рассматриваемом примере (рис.4) используется та же модель СТ, что и для рис.3. Моделируется КЗ в начале обмотки ВН. Обе характеристики (1 и 2) предполагают применение цифровых ТТ без эффекта насыщения. Характеристика 1 соответствует традиционному способу оценки дифференциального тока СТ [11]. Характеристика 2



рассчитывается на основе выражения (1), с учетом дополнительных компонент. Разница между временем перехода характеристик 1 и 2 в зону срабатывания составляет порядка 1,5-2 мс, и эта разница увеличивается при КЗ в конце обмотки ВН. Таким образом, оценка (1) может быть применена для повышения точности расчета дифференциального и тормозного тока СТ и быстродействия дифференциальной защиты СТ.

Оценка сопротивления СТ (2) и сопротивления петли КЗ (3) на основе измерений синхровекторов тока и напряжения СТ, может применяться как при совершенствовании защиты СТ, так и для реализации функций системы мониторинга его состояния.

На рис.5 показана структурная схема, отражающая общие принципы мониторинга состояния СТ на основе контроля его электромагнитных параметров по данным СВИ, а также внешний вид устройства мониторинга состояния СТ (МИСТ), которое в настоящее время уже находится в коммерческом производстве.

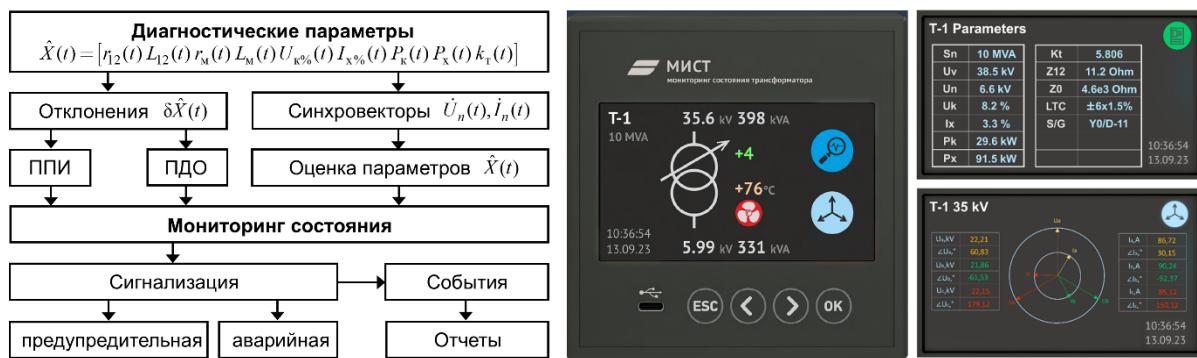


Рис. 5: Принципы мониторинга состояния СТ на основе СВИ

Расчет диагностических параметров СТ, в первую очередь, параметров схемы замещения (рис.2), производится на основе измерений его синхровекторов напряжения и тока. Для оценки точности расчета осуществляется вычисление допустимых отклонений величины параметра $X(t)$ с учетом пределов погрешности измерительной системы (ППИ) и допустимых нормативных отклонений этого параметра. Устройство МИСТ обеспечивает формирование событий предупредительной и аварийной сигнализации о выходе параметров СТ за допустимые пределы, периодическую запись отчетов о состоянии СТ, визуализацию параметров трансформатора согласно стандарту [12]. В настоящее время получены результаты опытно-промышленной эксплуатации системы мониторинга состояния СТ на базе устройства МИСТ на нескольких подстанциях 35-220 кВ, в том числе результаты мониторинга двухобмоточных, трехобмоточных СТ и автотрансформаторов. Эти результаты подтверждают возможность применения СВИ для непрерывного контроля параметров СТ и обеспечения его обслуживания по техническому состоянию.

ЗАЩИТА И МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ

В предыдущих работах авторами были рассмотрены вопросы совершенствования дистанционной защиты линии на основе применения и развития теории СВИ [4]. Был проведен анализ простейших математических моделей линии в синхровекторах процесса и получены выражения для точной оценки полного сопротивления линии и сопротивления петли КЗ в линии в различных условиях, в том числе при электромагнитных и электромеханических переходных процессах в энергосистеме.

В развитие предлагаемого подхода в докладе рассматриваются более точные модели линии с учетом параметров ее проводимости. Как известно, протяженные кабельные линии 6 кВ и выше, а также воздушные линии 110 кВ и выше имеют параметры емкостной проводимости, которые следует учитывать при расчетах [13].

На рис.6 приведены П-образные схемы замещения линии для различных режимов. Параметры R , L характеризуют сопротивление линии, R_i – сопротивление изоляции, C – емкость линии. На графиках также указаны синхровекторы напряжения и тока линии.

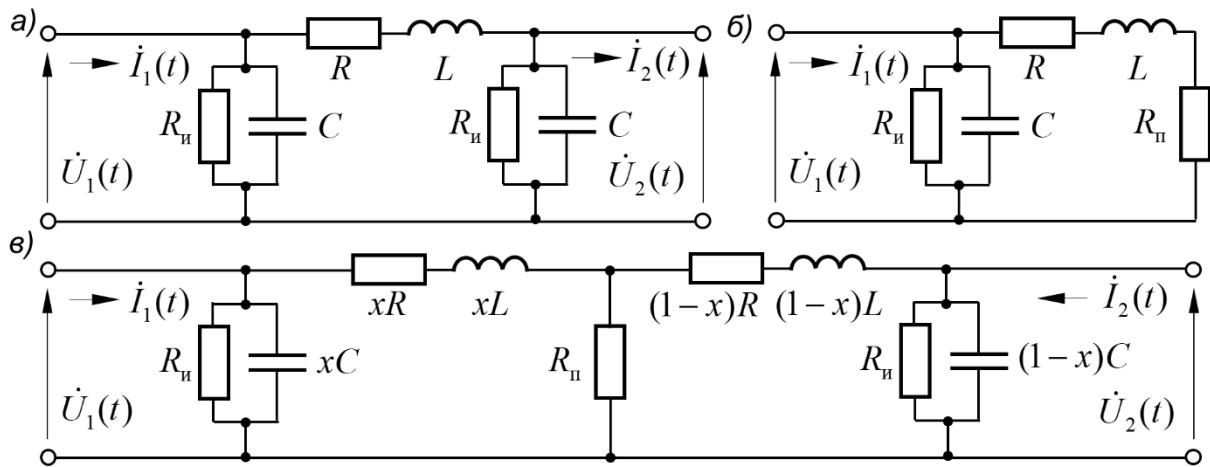


Рис. 6: Схемы замещения линии: а – нормальный режим работы, б – КЗ в линии при одностороннем питании, в – КЗ в линии при двухстороннем питании

Поскольку активная проводимость сопротивления изоляции для рассматриваемых типов линий много меньше емкостной проводимости $G_i \ll \omega_0 C$, при проведении расчетов по оценке параметров линии учет R_i не обязателен. На рис.6 также указано переходное сопротивление R_n в месте КЗ, которое необходимо учитывать. Рассмотрим подробнее каждый из приведенных примеров (рис.6).

Для нормального режима работы линии (без повреждений), в том числе при наличии электромеханических и электромагнитных переходных процессов в энергосистеме, например, при внешнем КЗ, ее схема замещения может быть представлена рис.6, а. Оценка параметров линии в таких режимах может быть использована для мониторинга состояния линии, идентификации данных параметров с учетом их изменения с течением времени при изменении внешних условий, повышения чувствительности, селективности и быстродействия работы релейной защиты за счет применения алгоритмов, учитывающих изменение параметров защищаемого объекта [14-15].

Исследования авторов подтверждают, что прямое применение синхровекторов напряжения и тока линии на основе метода комплексных амплитуд для оценки параметров линии будет приводить к существенным погрешностям в переходных режимах в энергосистеме, в том числе даже при незначительных колебаниях амплитуды и фазы напряжения и тока. В этом случае, с учетом емкостной проводимости линии, может быть предложено следующее выражение для оценки ее полного сопротивления:

$$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}'_1(t) - C(\underline{k}\dot{U}''_1(t) + (1 + j\underline{k}\omega_0)\dot{U}'_1(t) + j\omega_0\dot{U}_1(t))}, \quad (4)$$

где $\underline{k} = L_{\text{уд}} / z_{\text{уд}}$ – коэффициент, характеризующий удельные параметры линии;

$\dot{I}'_1(t)$, $\dot{U}'_1(t)$, $\dot{U}''_1(t)$ – производные синхровекторов тока и напряжения.

На рис.7 показан пример моделирования, демонстрирующий применение (4) для оценки полного сопротивления линии в условиях электромеханического переходного процесса в энергосистеме (пуск асинхронного двигателя). На графиках обозначены сопротивления линии с индексами: т – традиционный способ оценки на основе метода комплексных амплитуд; p1 – разработанный ранее способ без учета емкости [4]; p2 – оценка сопротивления линии по выражению (4). Кроме того, на рис.7,б для момента времени t_1 показано изменение оценки сопротивления линии в зависимости от задания комплексного коэффициента линии \underline{k} .

По графикам можно отметить, что традиционный способ дает погрешность оценки до 10 % от полного сопротивления линии при переходном процессе, при этом в оценке присутствуют значительные колебания, вызванные изменением модуля и фазы синхровекторов напряжения и тока линии.

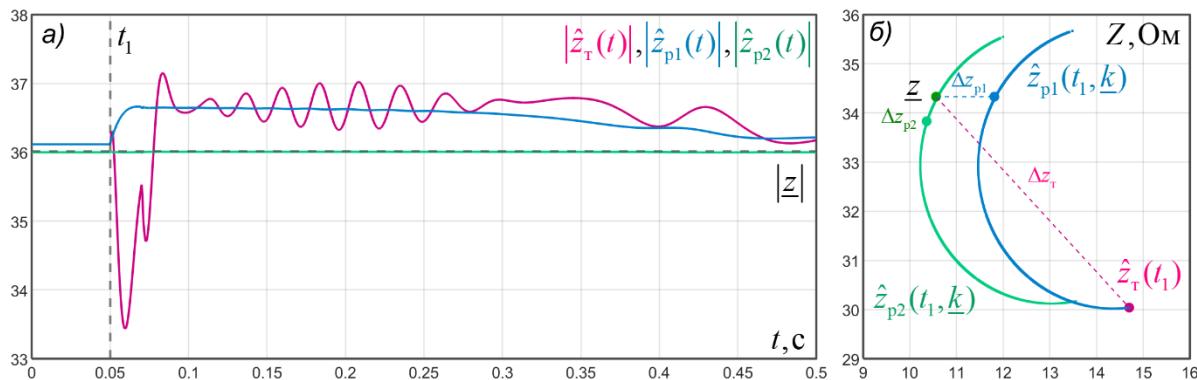


Рис. 7: Оценка сопротивления линии: а – электромеханический переходный процесс в энергосистеме, б – зависимость $\hat{z}(k)$, $\hat{z}(C)$

Разработанный ранее способ [4] без учета емкости обеспечивает погрешность оценки в пределах 2,5 %, а оценка по выражению (4) – в пределах 0,01 %. Также по графикам на рис.7, б для момента времени t_1 можно видеть, что погрешность оценки (4) Δz_{p2} даже при условии изменения k в пределах 10 % будет значительно меньше, чем погрешность традиционного способа оценки Δz_t . Кроме того, изменение емкости линии в пределах $\pm C$, характеризуемое погрешностью оценки Δz_{p1} , также существенно меньше, чем погрешность Δz_t . Для еще более высокой точности идентификации параметров линии в процессе мониторинга ее состояния по данным СВИ коэффициент k может постоянно уточняться и обновляться с учетом текущих условий работы линии.

Авторами также были получены аналогичные выражения для оценки сопротивления петли КЗ при односторонних и двухсторонних измерениях синхровекторов напряжения и тока линии [4]. Эти выражения являются основой совершенствования алгоритмов дистанционной защиты линии на основе СВИ.

В качестве примеров рассмотрим оценку сопротивления петли КЗ в линии при ее одностороннем питании и односторонних измерениях ее синхровекторов (рис.8), а также оценку сопротивления петли КЗ по двухсторонним измерениям синхровекторов, когда линия имеет питание с обоих концов (рис.9).

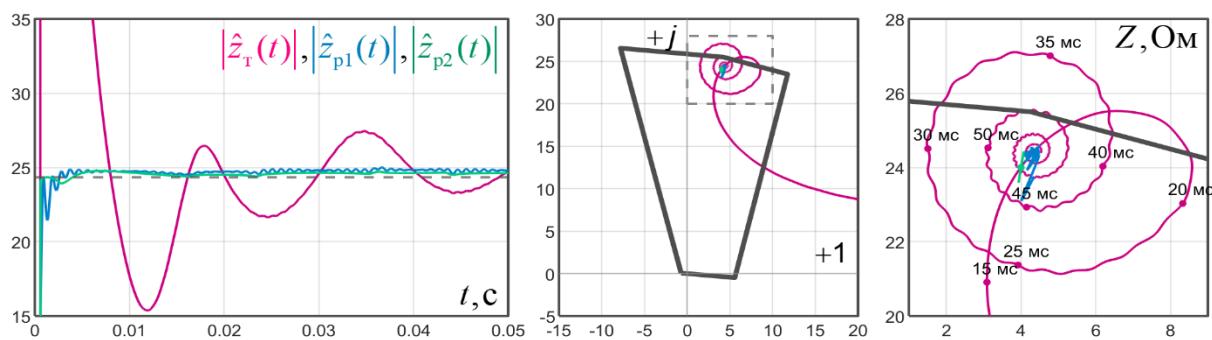


Рис. 8: Оценка сопротивления петли КЗ при односторонних измерениях синхровекторов

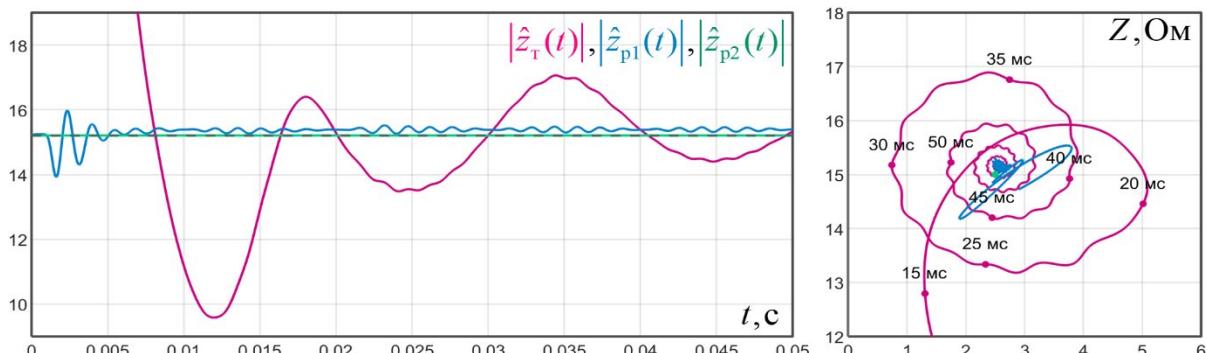


Рис. 9: Оценка сопротивления петли КЗ при двухсторонних измерениях синхровекторов



Рис.8 демонстрирует преимущества предлагаемого способа оценки сопротивления петли КЗ при повреждении на границе зоны действия 1-ой ступени дистанционной защиты. Колебания оценки сопротивления традиционным способом (индекс т) составляют в пределах от 100 % в первые 20 мс процесса и 10 % в последующие 20 мс. В то же время оценка разработанными способами (р1 и р2) обеспечивает погрешность в пределах 0,5 % уже в первые 10 мс. Учет емкости линии (р2) в данном случае не оказывает существенного влияния на точность оценки сопротивления петли КЗ.

Рис.9 показывает, что при двухсторонних измерениях синхровекторов точная оценка сопротивления петли КЗ разработанным способом достигается еще быстрее, чем при односторонних измерениях. Кроме того, в работе [4] было показано, что двухсторонние измерения позволяют полностью исключить переходное сопротивление в месте КЗ и обеспечить быструю и точную оценку сопротивления при условиях сочетания электромеханического и электромагнитного переходного процесса, а также при насыщении электромагнитных трансформаторов тока. Таким образом, развитие теории СВИ и разработка новых алгоритмов на основе измерений синхровекторов позволяют усовершенствовать работу дистанционной защиты линии, параметрических методов определения места повреждения в линии, а также обеспечивают возможность для точной идентификации параметров линии для реализации системы мониторинга ее состояния.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

В распределительных сетях 6-35 кВ важной задачей является реализация эффективных алгоритмов защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), а также локализация мест повреждений при ОЗЗ [16]. В настоящее время существует несколько основных подходов к разработке и реализации защиты от ОЗЗ [17-18]. В предыдущих работах авторами были представлены результаты исследований по разработке алгоритмов защиты от ОЗЗ и системы локализации ОЗЗ на основе измерений синхровекторов напряжения и тока нулевой последовательности (НП) промышленной частоты [7]. Эти алгоритмы были протестированы в ходе опытно-промышленной эксплуатации на нескольких действующих объектах электрических сетей 6-10 кВ и подтвердили свою эффективность. В то же время для ряда сетей 6-35 кВ, в особенности для сетей с компенсацией тока ОЗЗ и для воздушных линий с малым емкостным током, необходима реализация алгоритмов защиты от ОЗЗ, способных обеспечивать высокие показатели чувствительности и селективности действия в переходном режиме ОЗЗ, в том числе при перемежающихся дуговых замыканиях [16]. В развитие подхода реализации защиты от ОЗЗ на основе технологии СВИ в докладе рассматривается применение эквивалентных синхровекторов напряжения и тока НП для защиты от ОЗЗ на адmittансном принципе [6].

Оценка проводимости (адmittанса) присоединения распределительного устройства при ОЗЗ, в первую очередь емкости фидера, на основе расчета эквивалентных синхровекторов высших гармоник имеет преимущества для сетей с компенсированной нейтралью и малым емкостным током. Измерение синхровекторов отдельных гармоник может быть не всегда эффективным, поскольку состав и уровень гармоник в различных сетях может быть неодинаков [19]. Малая величина тока НП может являться причиной значительной погрешности измерений и, соответственно, погрешности оценки емкости фидера. Для повышения эффективности алгоритмов защиты от ОЗЗ на основе измерений составляющих высших гармоник тока НП предлагается применение оценки емкости фидера по эквивалентным синхровекторам гармоник:

$$\hat{C}_0(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} (\dot{I}_{0m}(t) - G_0 \dot{U}_{0m}(t)) \Big/ \sum_{n=1}^{N_{\max}} (\dot{U}'_{0m}(t) + j\omega_0 \dot{U}_{0m}(t)), \quad (5)$$

где $\dot{U}_{0m}(t)$, $\dot{I}_{0m}(t)$ – измеряемые синхровекторы напряжения и тока НП гармоник;

$m = 2n+1$, n – порядок гармоники; $G_0 \leq 10^{-6}$ – активная проводимость линии.



Выражение (5) позволяет производить точную оценку емкости фидера как в установившемся, так и в переходном режиме ОЗЗ. При этом эта оценка не зависит от какой-либо отдельной гармоники и ее уровня. Для подтверждения эффективности данного подхода было проведено математическое моделирование, а также тестирование алгоритма защиты от ОЗЗ на основе СВИ по данным осциллографов реального ОЗЗ в кабельной сети 10 кВ. На рис.10 представлены осциллографы токов НП в поврежденном и неповрежденном фидере сети при ОЗЗ, а также оценка емкости фидеров с помощью традиционного способа (индекс т) [20] и по представленному выражению (индекс р).

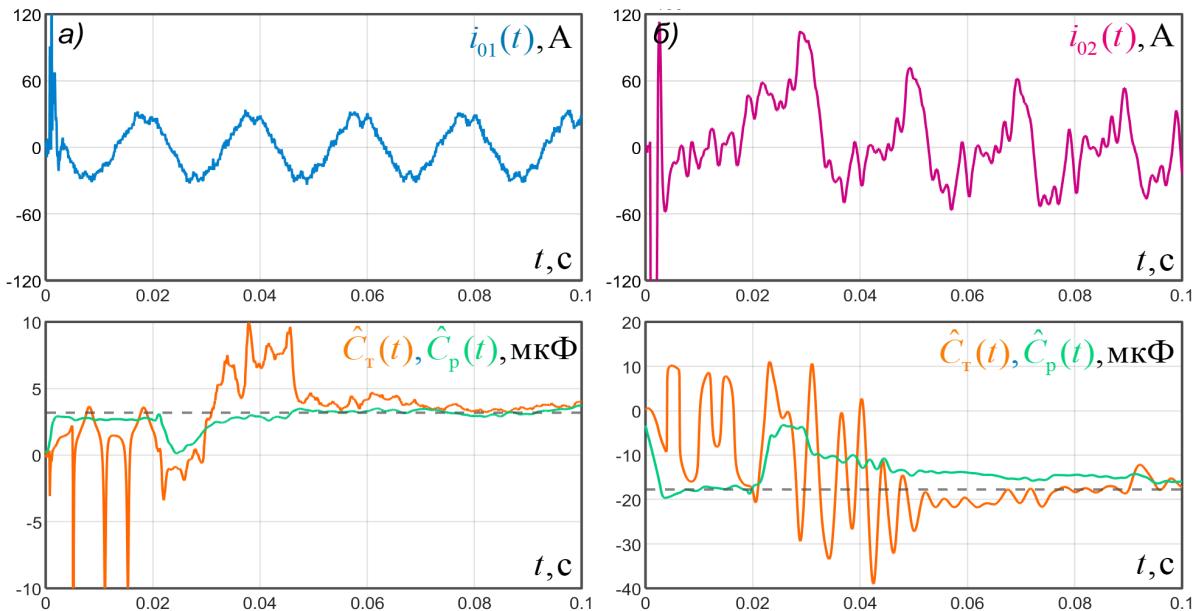


Рис. 10: Ток НП и оценка емкости фидера при ОЗЗ в кабельной сети 10 кВ: а – неповрежденный фидер, б – поврежденный фидер

Следует отметить, что если в первые 20-40 мс переходного процесса ОЗЗ токи $i_{01}(t)$ и $i_{02}(t)$ существенно отличались по амплитуде и составу гармоник, то в установившемся режиме ОЗЗ их величина по основной гармонике практически сопоставима, что ограничивает применение методов на основе измерений составляющих промышленной частоты [20]. В данном случае для оценки емкости фидера используется только три гармоники (3-я, 5-я, 7-я), и при этом предлагаемый подход показывает существенно более точную оценку емкости $C_p(t)$, чем традиционный $C_t(t)$. Фактически в первые 20 мс изменения емкости $C_t(t)$ находятся в пределах 100-200 % от его теоретического значения. Кроме того, эти изменения происходят как в положительную, так и в отрицательную область значений C . В свою очередь, оценка $C_p(t)$ в первые 20 мс имеет погрешность не более 10 %, при этом нужно учитывать, в переходном режиме ОЗЗ из-за значительной апериодической составляющей тока ОЗЗ и большой амплитуды гармоник наступает насыщение электромагнитных ТТ НП. Повысить точность оценки $C_p(t)$ возможно за счет применения цифровых ТТ без эффектов насыщения и остаточной намагниченности [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе рассмотрены принципы реализации алгоритмов систем защиты, мониторинга, автоматики и управления на основе технологии СВИ. Представлены подходы для интеграции технологии СВИ в ВАПС, применения цифровых измерительных ТТ и ТН. Показано теоретическое обоснование для разработанных алгоритмов. Результаты их тестирования на различных математических и виртуальных моделях и на данных осциллографов реальных аварийных событий, а также опыт их применения в производимых устройствах с поддержкой СВИ подтверждают их эффективность и перспективы применения в распределительных сетях.



ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жуков А. В., Дубинин Д. М. Внедрение ПТК СМПР на объектах электроэнергетики: эффективный инструмент повышения надежности энергосистемы // Релейщик. - М.: Издательский дом «Вся электротехника». – 2013. – №. 3. – С. 16.
- [2] Мокеев А. В. и др. Идентификация и поиск источника низкочастотных колебаний на основе СВИ // Электричество. – 2024. – № 9. – С. 23-36.
- [3] Филиппов, С. П. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов / С. П. Филиппов, М. Д. Дильман, П. В. Илюшин // Теплоэнергетика. – 2019. – № 12. – С. 4-17.
- [4] Мокеев А. В., Пискунов С. А. Дистанционная защита на основе одностороннего и двухстороннего измерения синхровекторов // Релейная защита и автоматизация. – № 1 (54). – 2024. – С. 8-15.
- [5] Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. Автоматизация понизительных подстанций на основе технологии СВИ // Релейная защита и автоматизация. – 2024. – № 3(56). – С. 10-18.
- [6] Piskunov S.A, Mokeev A.V. Research of Algorithms for Line Distance and Admittance Protection Based on SPM // 7th RPA Conference, November 2024.
- [7] Мокеев А. В., Пискунов С. А. Развитие теории синхронизированных векторных измерений для совершенствования систем управления, мониторинга, релейной защиты и автоматики // Релейщик. – 2023. – №. 1. – С. 12-19.
- [8] Об утверждении Концепции развития релейной защиты, автоматики и АСУ ТП электросетевого комплекса группы компаний "Россети" / Приложение 1 к приказу ПАО «Россети» и ПАО «ФСК ЕЭС» от 24.06.2022 № 286. – Москва, 2022. – 43 с.
- [9] Ульянов Д. Н., Плакидин Р.С. Цифровой измерительный трансформатор среднего напряжения // Материалы Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко, Архангельск, 15–19 июля 2024 года. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2024. – С. 686-694.
- [10] Мокеев, А.В. Анализ синхровекторов переходных процессов в энергосистеме / А.В. Мокеев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 1. – С. 62-71.
- [11] Циглер, Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. – Перевод с англ. / под ред. Дьякова А.Ф. – М.: Знак. 2008. – 216 с.
- [12] Трансформаторы силовые, автотрансформаторы и реакторы. Автоматизированная система мониторинга и технического диагностирования. Общие технические требования / ОАО "ФСК ЕЭС" СТО 56947007-29.200.10.011. – Москва, 2019. – 66 с.
- [13] Файбисович, Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Д. Л. Файбисович. – Москва : ЭНАС, 2012. – 376 с.
- [14] Иванов И.Е. Совершенствование методов определения параметров воздушных линий электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений : дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2019. – 275 с.
- [15] Антонов В.И. и др. Основы релейной защиты и автоматики интеллектуальной электрической сети: монография. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 324 с.
- [16] Шuin В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ // М.: НТФ «Энергопрогресс». – 104 с.
- [17] Шuin В. А. и др. Адаптивные токовые защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электрические станции. – 2018. – №. 7. – С. 38-45.
- [18] Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю. – Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №03(08). – С. 50-57.
- [19] Кискачи В.М. Расчет минимального уровня высших гармоник при ОЗЗ в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью // ВНИИЭ. - 1966. - №. 26. - С. 89-105.
- [20] Wahlroos A, Altonen J. Application of novel multi-frequency neutral admittance method into earth-fault protection in compensated MV-networks // DPSP 2014. - IET, 2014. - P.1-6.