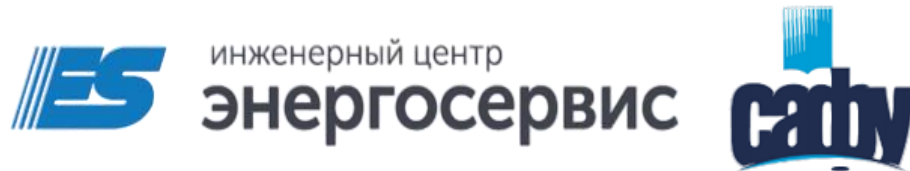




VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА

МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ

«Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики»



АВТОМАТИЗАЦИЯ ЦЕНТРОВ ПИТАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВИ

Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н.

24 апреля 2025 г.

г. Чебоксары



Актуальность темы исследования:

- ❑ низкий уровень автоматизации центров питания распределительных сетей (РС);
- ❑ раздельное исполнение систем сбора и передачи данных;
- ❑ развитие цифрового измерительного оборудования и многофункциональных ИЭУ;
- ❑ новые требования к системам автоматизации подстанции.

Задачи исследования:

- ❑ анализ текущего уровня автоматизации распределительных сетей;
- ❑ формирование новых подходов к системам автоматизации центров питания РС;
- ❑ разработка усовершенствованных алгоритмов защиты и мониторинга СТ на основе СВИ;

Достоверность результатов:

- ❑ математическое и физическое моделирование;
- ❑ внедрение устройства мониторинга состояния силового трансформатора;
- ❑ результаты опытно-промышленной эксплуатации АСМД.



Таблица 1 Описание систем автоматизации РС

Система	Особенности	Перспективы развития
Релейная защита и автоматика	- применение токовой релейной защиты на ПС с малой установленной мощностью СТ; - минимальный уровень автоматизации (ТС, ТИ); - РЗА не предполагает работу в сети с РГ.	- совершенствование дифференциальной защиты трансформатора на основе СВИ, применение ДЗШ; - дистанционные принципы защиты отходящих линий; - совершенствование режимной и противоаварийной автоматики (для сетей с РГ, ВИЭ), применение САВС.
Мониторинг и управление	- большая доля повреждений СТ связана с его э/м системой + наибольшее число повреждений в РС; - преобладает контроль других параметров (ХАРГ, ЧР), высокая стоимость АСМД.	- контроль э/м параметров СТ на основе СВИ; - интеграция функций мониторинга в РЗА; - снижение относительной стоимости АСМД для РС; - ТОиР СТ по его состоянию.
Измерение	- отсутствие ТН на стороне ВН, СН; - применение э/м ТТ, ТН (насыщение, остаточная намагниченность, погрешность при малой нагрузке); - большой объем вторичных цепей, зависимость от изменения вторичной нагрузки.	- применение цифровых ТТ/ТН, одно комбинированное устройство для целей РЗА и измерений (ВН 6-35 кВ); - отсутствие эффектов насыщения, остаточной намагниченности; - точные измерения в широком диапазоне, в т.ч. при малой нагрузке; - преимущества цифровой обработки сигналов.

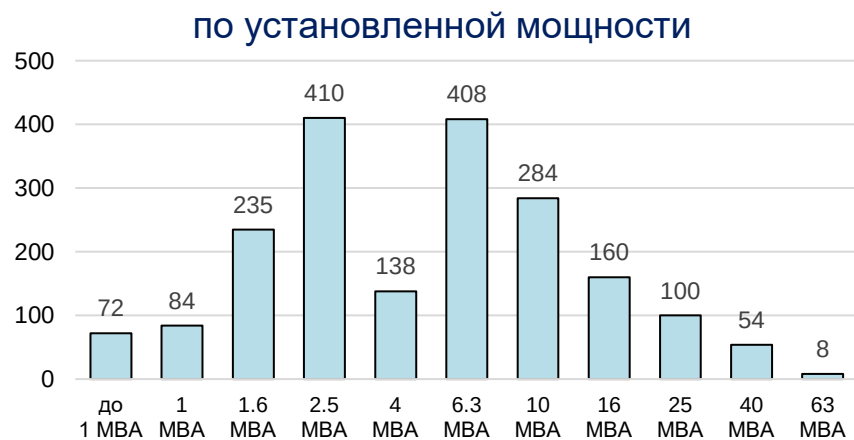


Рис.1 – Статистика по трансформаторному оборудованию РС (филиала ПАО «Россети», 2021 г.)

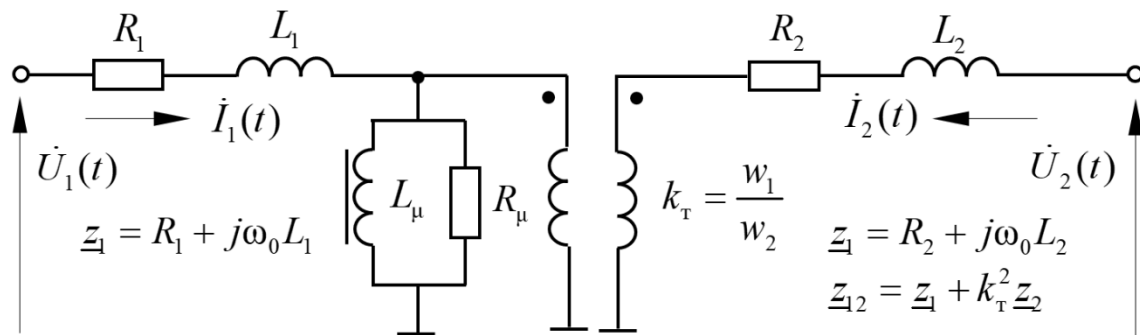


Рис.2 – Т-образная схема замещения СТ

Дифференциальное уравнение СТ в синхровекторах процесса:

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

Обозначения:

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

Таблица 2 Применение разработанных алгоритмов на основе СВИ

Тип	Характеристика	Выражение
Мониторинг состояния СТ	- оценка параметров СТ в нормальном режиме (в т.ч. при внешних КЗ, развитии повреждений и др.); - обеспечение функций АСМД.	$\hat{\underline{z}}_{12}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - k_\tau \dot{U}_2(t)}{x(\dot{I}_1(t) + \underline{k} \dot{I}'_1(t)) + (1-x)k_\tau^{-1}(\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t))}, x = 1/2 \text{ при } \hat{\underline{z}}_1 = k_\tau^2 \hat{\underline{z}}_2$
Дифференциальный принцип защиты	- оценка дифференциального тока СТ; - дополнительный критерий для блокировки защиты при БНТ, дифференциально-фазный принцип, высокое быстродействие; - снижение тока небаланса.	$ \dot{I}_\Delta(t) = \dot{I}_1(t) + \underline{k} \dot{I}'_1(t) - k_\tau^{-1}(\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t)),$ $\varphi_\Delta(t) = \arg \left(\frac{\dot{I}_1(t) + \underline{k} \dot{I}'_1(t)}{\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t)} \right), \hat{L}_\mu(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \underline{z}_1 \dot{I}_1(t) + L_1 \dot{I}'_1(t)}{\dot{J}_1(t) + k_\tau^{-1} \dot{J}_2(t)}$
Дистанционный принцип защиты	- оценка сопротивления при внутреннем КЗ; - высокое быстродействие и точность при э/м процессах.	$\hat{\underline{z}}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - k_\tau \dot{U}_2(t) + k_\tau^{-1} \underline{z}_{12}(\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t))}{\dot{I}_1(t) + \underline{k} \dot{I}'_1(t) + k_\tau^{-1}(\dot{I}_2(t) + \underline{k} \dot{I}'_2(t))}$

Преимущества:

- быстрая и точная оценка модуля и фазы синхровектора дифференциального тока;
- повышение быстродействия защиты при двухстороннем питании (наличии подпитки КЗ);
- дополнительный критерий для блокирования защиты при БНТ.

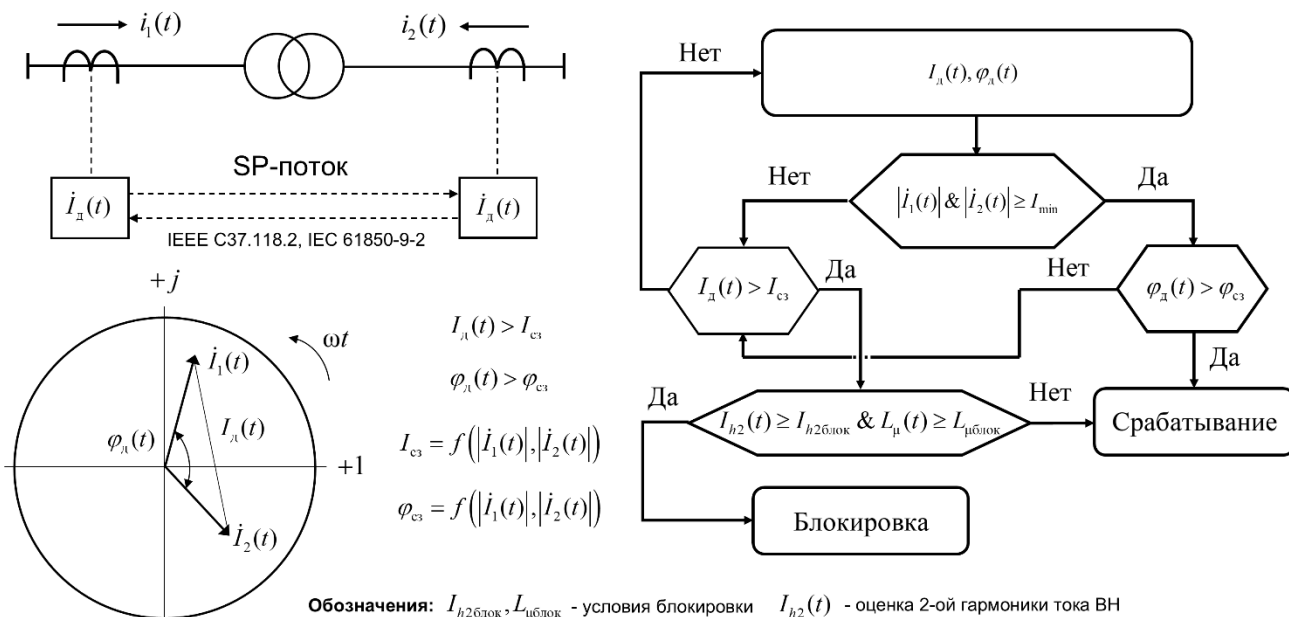


Рис.3 – Структурная схема защиты ДЗ СТ

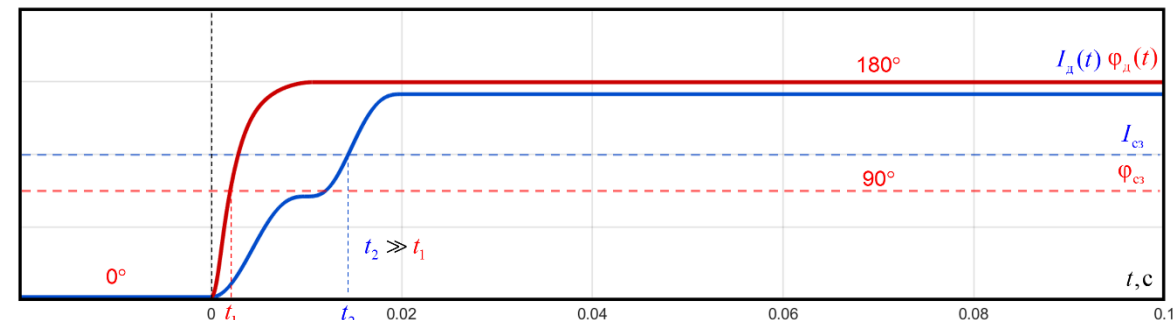


Рис.4 – Оценка модуля и фазы синхровектора дифференциального тока

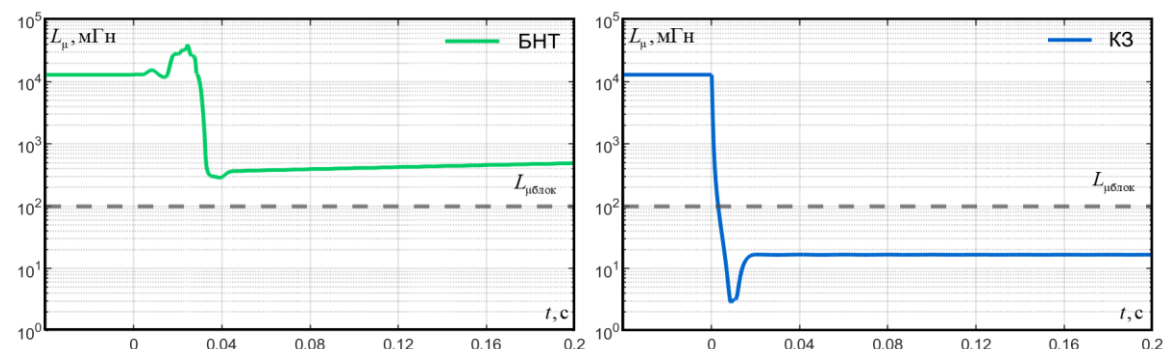


Рис.5 – Оценка индуктивности намагничивания

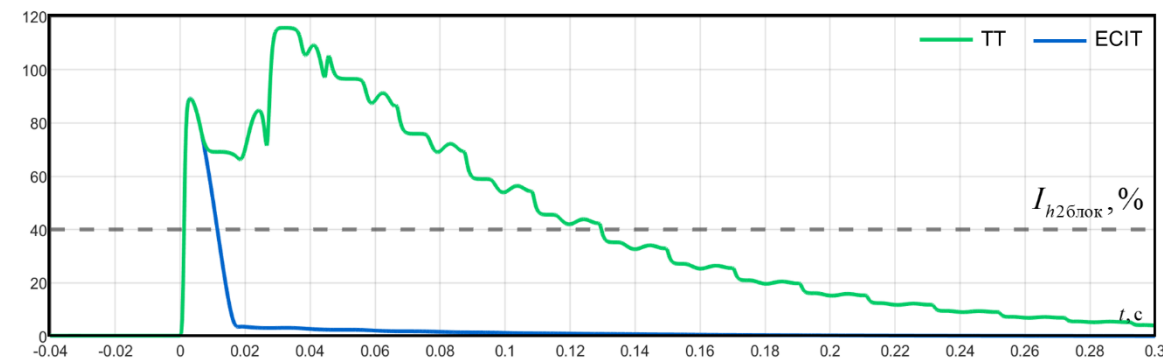


Рис.6 – Вторая гармоника тока при БНТ



Требования к АСМД:

- ❑ сбор, хранение, обработка данных и непрерывный контроль параметров СТ;
- ❑ предназначены для всего силового масляного трансформаторного оборудования.

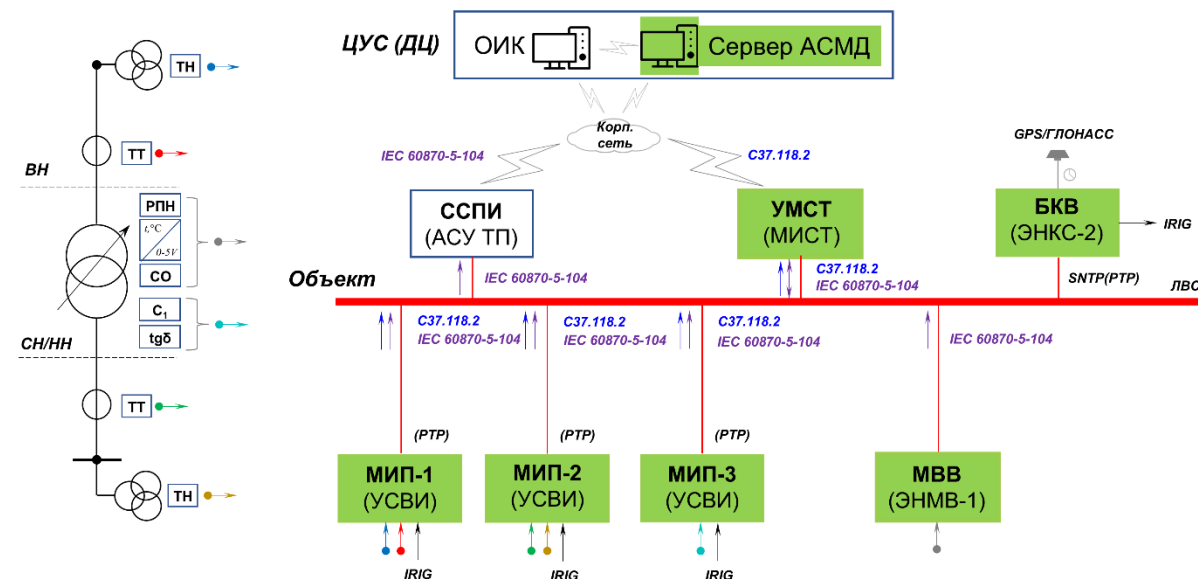
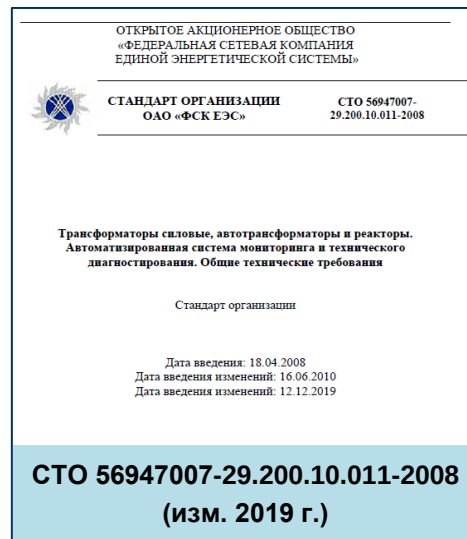


Рис.7 – Структурная схема АСМД на базе МИСТ

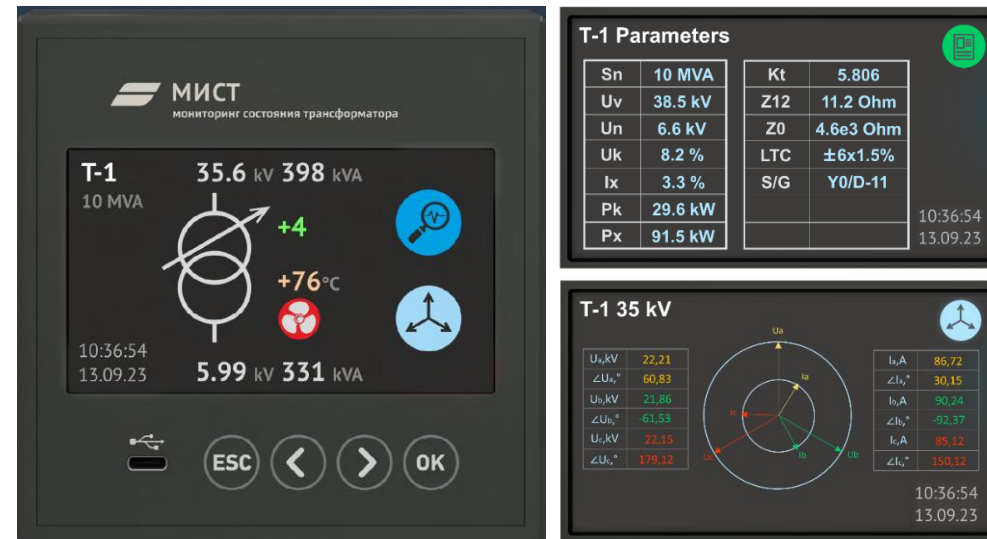


Рис.8 – Устройство мониторинга состояния СТ

Характеристика устройства:

- ❑ сбор и хранение результатов оценки технического состояния силового трансформатора;
- ❑ визуализация предупредительной и аварийной сигнализации;
- ❑ хронологическое протоколирование событий;
- ❑ средства самодиагностики системы;
- ❑ стандартные протоколы обмена;
- ❑ наращиваемость и расширяемость (подключение дополнительных модулей, датчиков).

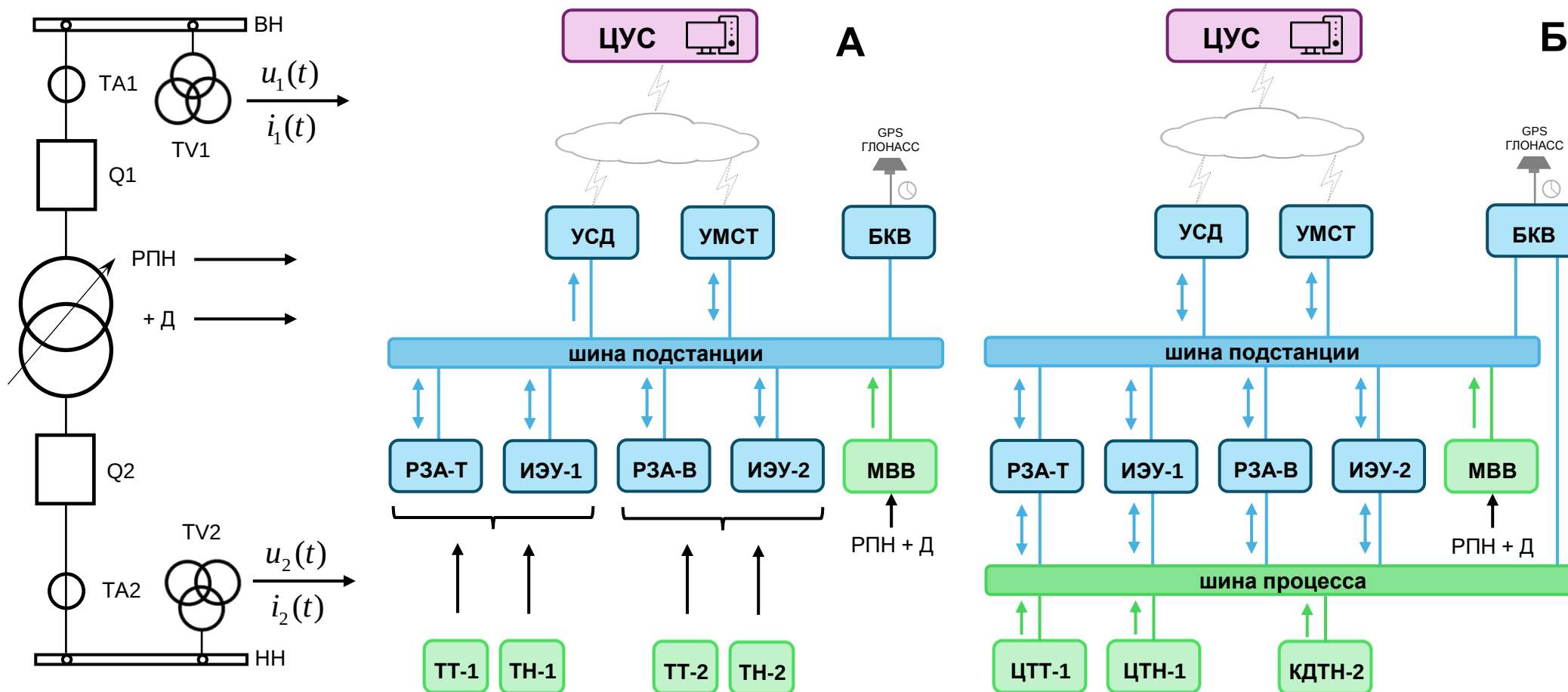


Рис.9 – Структурная схема автоматизации подстанции

ЦУС – центр управления сетью, **УСД** – устройство сбора данных, **УМСТ** – устройство мониторинга состояния СТ, **РЗА-Т** – устройство защиты и автоматики СТ, **БКВ** – блок коррекции времени, **МВВ** – модуль ввода/вывода, **Д** – датчики дополнительных параметров, **РЗА-В** – РЗА ввода НН, **ЦТТ/ЦТН** – цифровые трансформаторы тока и напряжения
А – существующие объекты, **Б** – вновь строящиеся объекты



Преимущества:

- ❑ отсутствие эффекта насыщения, остаточной намагниченности;
- ❑ точные измерения тока и напряжения в широком диапазоне;
- ❑ передача потоков синхровекторов (SP потоков);
- ❑ снижение объемов передаваемых данных;
- ❑ самодиагностика измерительной системы.

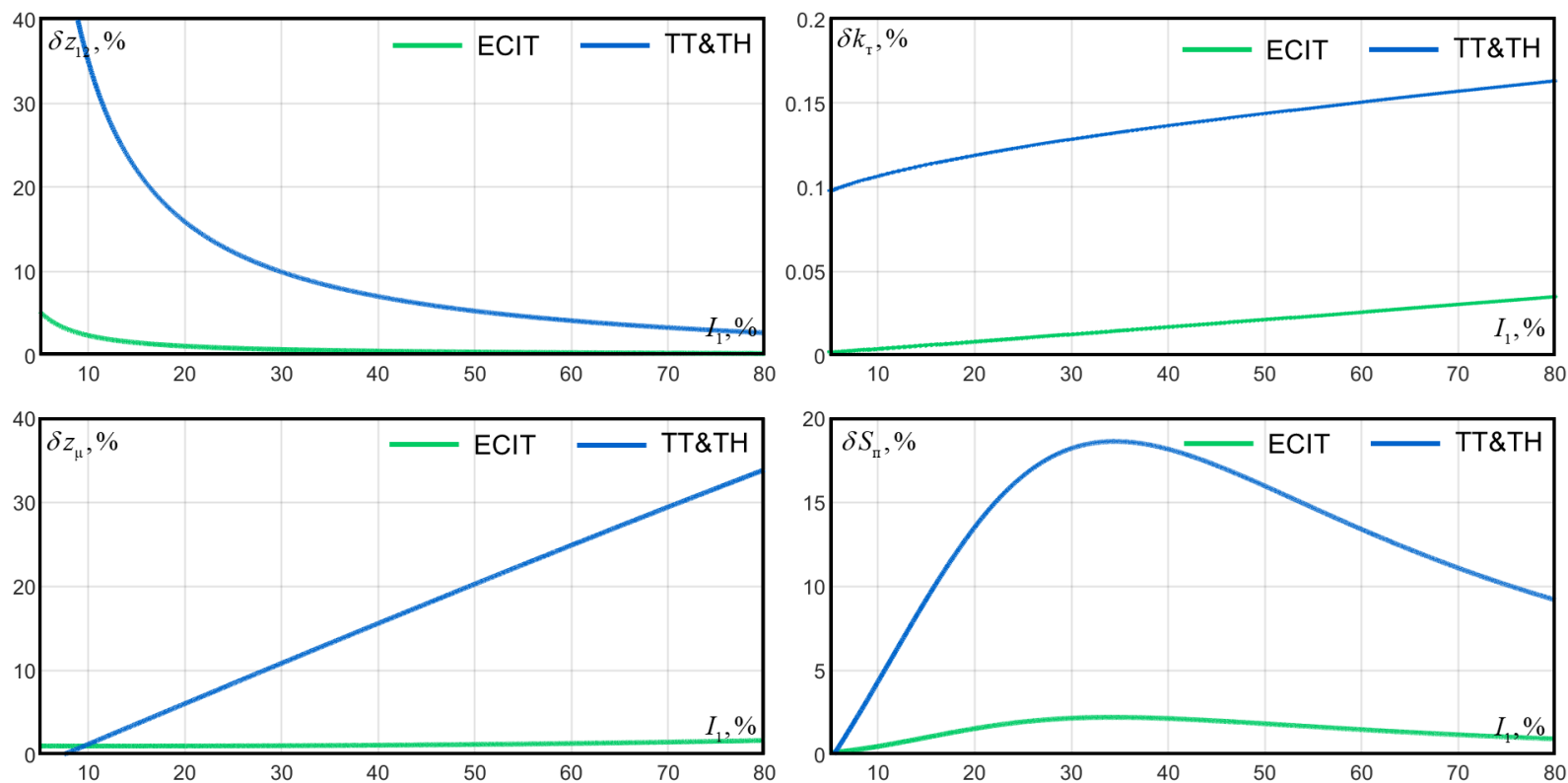


Рис.10 – Погрешность оценки параметров СТ

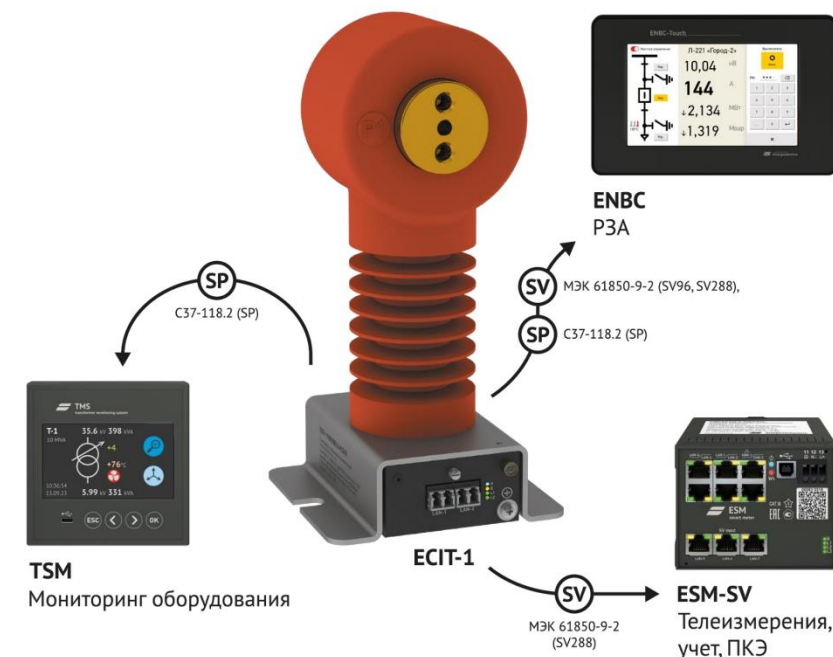


Рис.11 – Комбинированный цифровой измерительный трансформатор ECIT

Ссылки:

1. Ульянов Д.Н., Плакидин Р.С., Андреев П.И., Мокеев А.В. Трансформатор комбинированный измерительный ECIT, особенности и характеристики встроенного высоковольтного датчика напряжения // Релейщик. - 2023. - № 1(45). - С. 18-19.
2. Ульянов Д.Н., Плакидин Р.С. Цифровой измерительный трансформатор среднего напряжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. - ИСЭМ, в.75. - Иркутск. - 2024. - С. 686-694.



Описание модели:

- ❑ модель распределительной сети, силовой трансформатор 35/6 кВ, 10 МВА;
- ❑ внутренние модели электромагнитных ТТ и цифровых ТТ (характеристики ЕСИТ);
- ❑ расчет уставок токовых и дифференциальных защит СТ по традиционным методикам;
- ❑ реализация алгоритма дифференциальной защиты на синхровекторах (ДЗСВ);
- ❑ применение оценки L_μ в ДЗСВ как дополнительного критерия отстройки от БНТ;
- ❑ моделирование различных режимов работы СТ (холостой ход, внутренние повреждения, внешние КЗ).

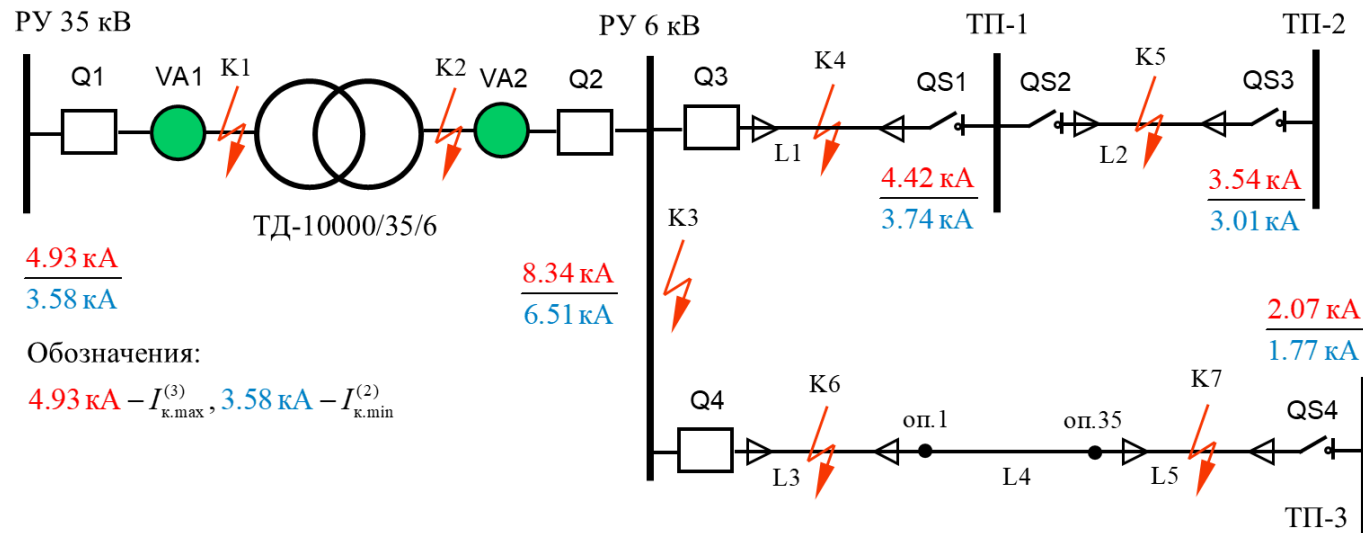


Рис.12 – Структурная схема модели

Таблица 3 Результаты моделирования

№ п/п	Тип защиты	Время срабатывания, мс						
		K1-1	K1-2	K2	K3	K4	K7	БНТ
1	ТО	68,0	70,3	-	-	-	-	-
2	ТО ПН	60,7	20,3	-	-	-	-	-
3	МТЗ	203,6	204,7	205,6	205,7	208,3	218,3	-
4	ДТО	44,7	46,2	47,6	-	-	-	-
5	ДЗТ	130,1	75,9	18,3	-	-	-	-
6	ДЗСВ	12,1	3,8	3,8	-	-	-	-



Результаты:

- ❑ 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).

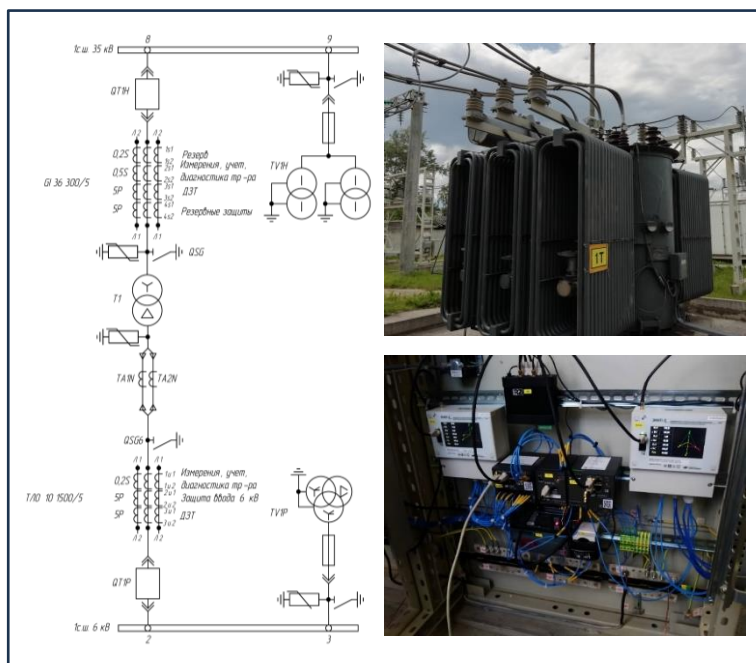


Рис.13 – ОПЭ ПС-8 (2018)

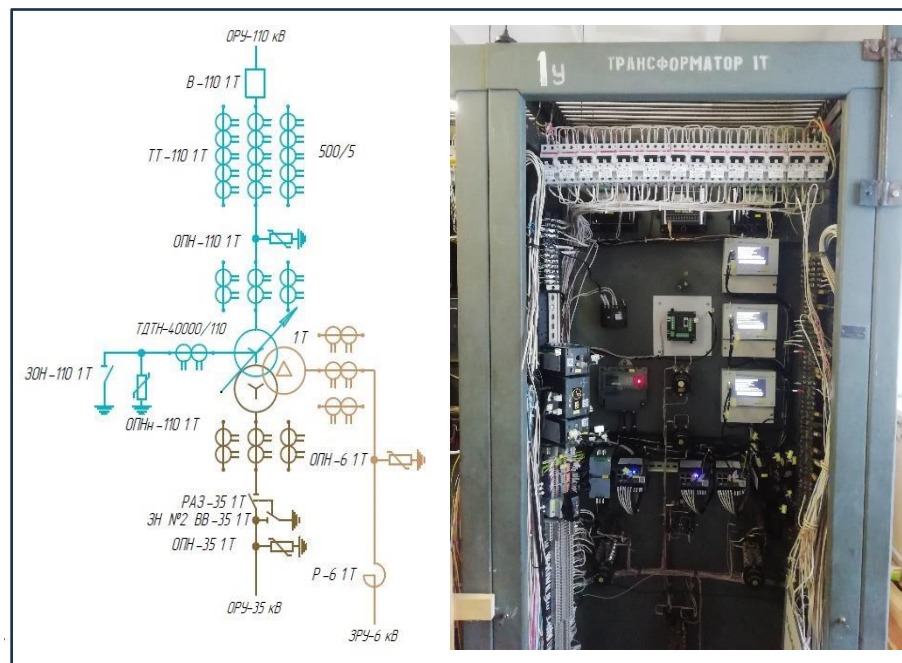


Рис.14 – ОПЭ ПС-7 (2021)



Рис.15 – НИР + патент (2021-2024)

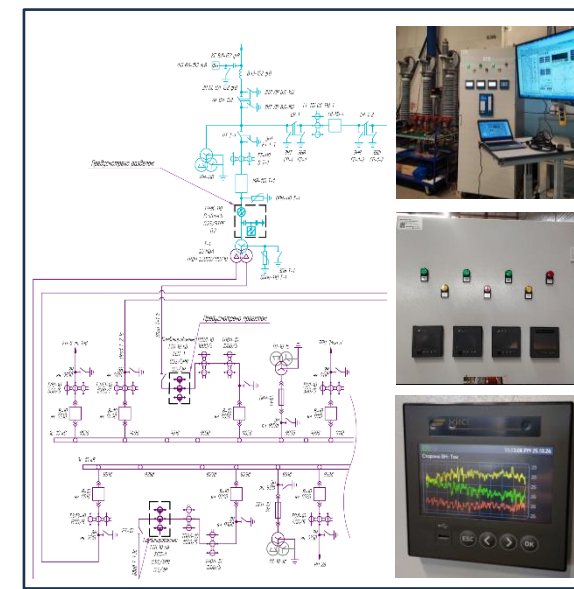


Рис.16 – НИОКР (2024-2025)



Период проведения измерений (UTC+0): 2024.07.06 00:00:00 – 2024.07.07 00:00:00

Общие сведения

Объект: ПС-7

Трансформатор: Т-1

Фазные напряжения

Среднее значение, кВ			Среднее отклонение, %			Максимальное отклонение, %		
U _{1a}	U _{1b}	U _{1c}	δU _{1a}	δU _{1b}	δU _{1c}	δU _{1a}	δU _{1b}	δU _{1c}
68.6792	69.0844	68.9505	8.14	8.78	8.57	9.33	10.02	9.81
U _{2a}	U _{2b}	U _{2c}	δU _{2a}	δU _{2b}	δU _{2c}	δU _{2a}	δU _{2b}	δU _{2c}
21.0051	21.3180	21.3345	3.95	5.5	5.58	106.96	95.67	79.11
U _{3a}	U _{3b}	U _{3c}	δU _{3a}	δU _{3b}	δU _{3c}	δU _{3a}	δU _{3b}	δU _{3c}
3.5885	3.6029	3.5976	3.59	4.01	3.85	45.18	48.4	48.59

Фазные токи

Среднее значение, А			Минимальное значение, А			Максимальное значение, А		
I _{1a}	I _{1b}	I _{1c}	I _{1a}	I _{1b}	I _{1c}	I _{1a}	I _{1b}	I _{1c}
28.7973	28.8432	28.9581	18.1000	18.7000	18.8000	750.7500	770.6500	723.4000
I _{2a}	I _{2b}	I _{2c}	I _{2a}	I _{2b}	I _{2c}	I _{2a}	I _{2b}	I _{2c}
78.3360	79.7699	79.7680	48.5400	51.7200	51.1200	1525.2600	1536.1801	1468.0801
I _{3a}	I _{3b}	I _{3c}	I _{3a}	I _{3b}	I _{3c}	I _{3a}	I _{3b}	I _{3c}
75.2075	71.5248	74.4194	42.6000	31.5000	42.0000	169.2000	160.5000	142.5000

Потери мощности

Среднее значение, кВт/кВА			Мин. значение, кВт/кВА			Макс. значение, кВт/кВА		
P _d	Q _d	S _d	P _d	Q _d	S _d	P _d	Q _d	S _d
7.7937	60.8863	61.4014	-66.8018	16.5850	33.1773	5593.7644	31656.0238	32146.4468
Отклонение, %	5.99	Отклонение, %	0	Отклонение, %	408.7			

Коэффициенты мощности и загрузки

Импедансы схемы замещения

08.07.2024, 17:32

2024-07-06-00-00-00_2024-07-07-00-00-00_ПС-7_Т-1

Обозначение	Уровень 1		Уровень 2	
	Количество	Время, мин.	Количество	Время, мин.
δU _{1a}	0	0	0	0
δU _{1b}	0	0	0	0
δU _{1c}	0	0	0	0
δU _{2a}	2	0	0	0
δU _{2b}	3	0	0	0
δU _{2c}	16	0	1	150
δU _{3a}	0	0	1	0
δU _{3b}	0	0	0	0
δU _{3c}	0	0	1	0
δS _d	0	0	0	0
δZ ₁	0	0	0	0
δZ ₃	1724	106	615	274
δZ ₀	0	0	0	0
δKt ₁₂	0	0	0	0
δKt ₁₃	0	0	0	0
k ₁	0	0	0	0
k ₁ (K _{2max})	0	0	0	0
Θ _м	0	0	0	0
Θ _{ннт}	0	0	0	0
F _p	0	0	0	0

Общее время работы системы: 1458 ч. (60 д. 18 ч. 36 мин.)

Общий износ витковой изоляции: 1 ч. (0 д. 1 ч. 16 мин.)

Относительный износ витковой изоляции: 0.09 %.

Качество данных

Статус измерений: 100 %.

Дополнительные признаки: 99.31 %.

Общее время работы системы: 1458 ч. (60 д. 18 ч. 36 мин.)

Общий износ витковой изоляции: 1 ч. (0 д. 1 ч. 16 мин.)

Относительный износ витковой изоляции: 0.09 %.

Качество данных

Статус измерений: 100 %.

Дополнительные признаки: 99.31 %.

- ❑ создание отчетов в текстовом формате;
- ❑ функция отражения не менее 30-ти различных параметров на одном бланке;
- ❑ с выбором требуемого диапазона времени различной дискретности;
- ❑ (суточные, недельные, месячные, годовые отчеты).

Рис.17 – Форма суточного отчета МИСТ



- ❑ представлены сводные данные о работе АСМД на одном из действующих объектов (за год);
- ❑ недопустимых отклонений в контролируемых параметрах СТ не обнаружено (повреждений нет);
- ❑ зафиксированы события, связанные с режимами работы СТ и режимами работы сети;
- ❑ выявлена несимметрия фазных напряжений СН, связанная с особенностью схемы подключения ТН;
- ❑ установлены режимы перегрузки СТ, протекания токов сквозных КЗ (расчет износа изоляции);
- ❑ контролируется работа переключателя ступеней РПН (функция логометра).

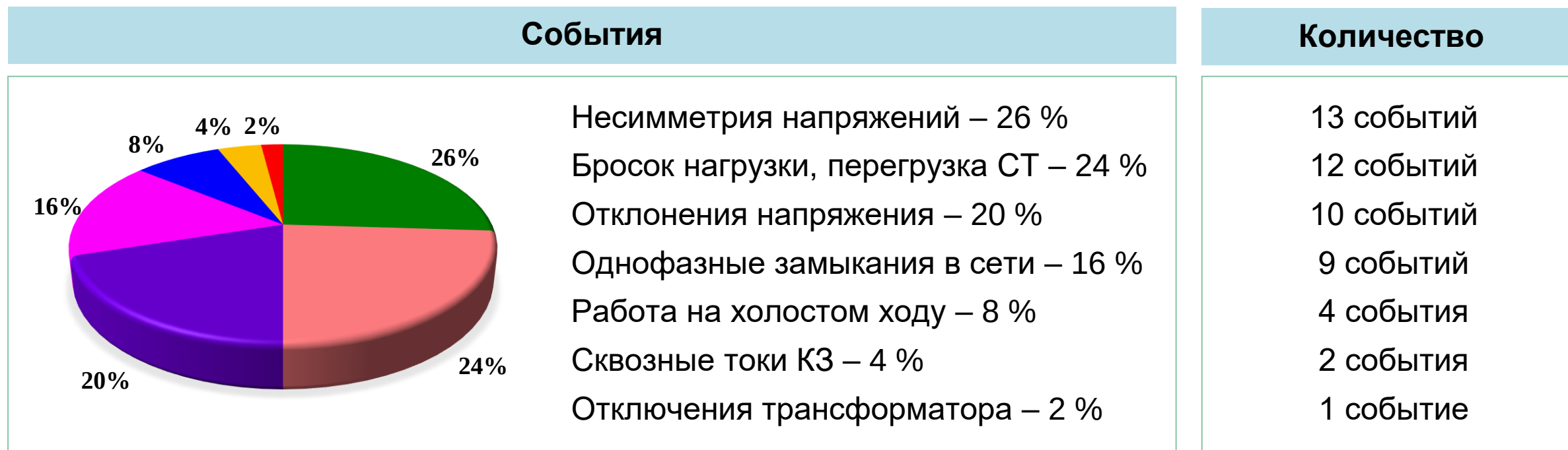


Рис.18 – Статистика зафиксированных событий за год работы АСМД (ПС-7, Архэнерго)

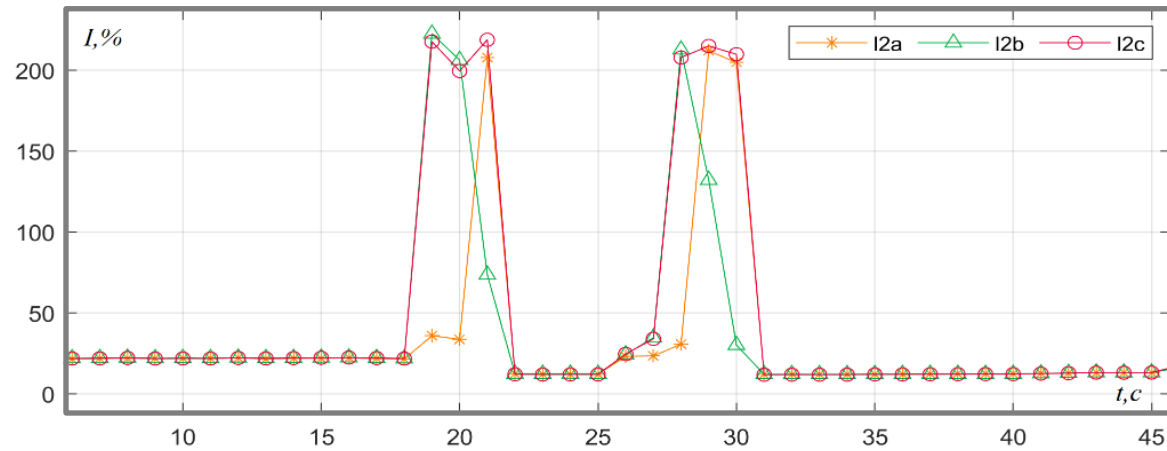


Рис.19 – Сквозной ток КЗ через СТ

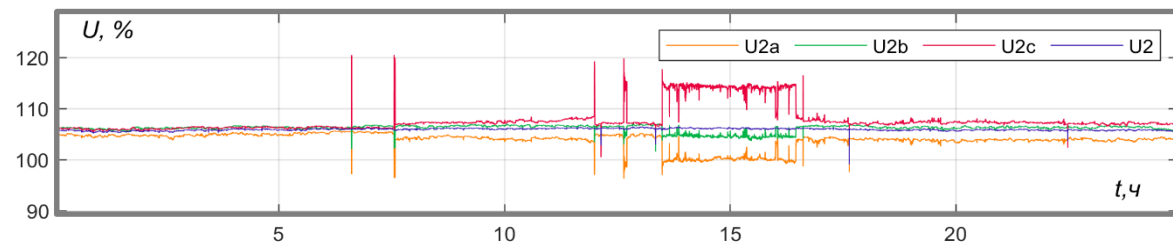


Рис.20 – Несимметрия напряжений СН

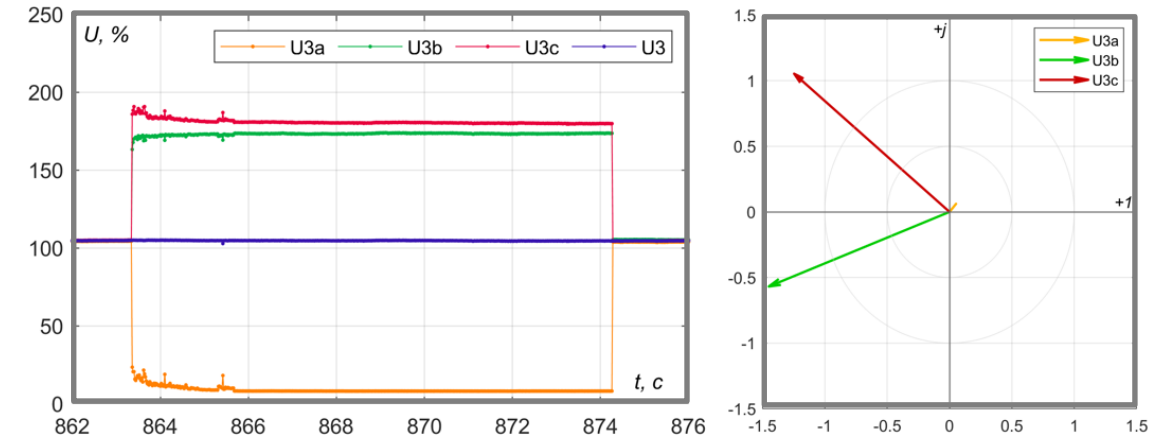


Рис.21 – ОЗЗ в сети НН 6 кВ

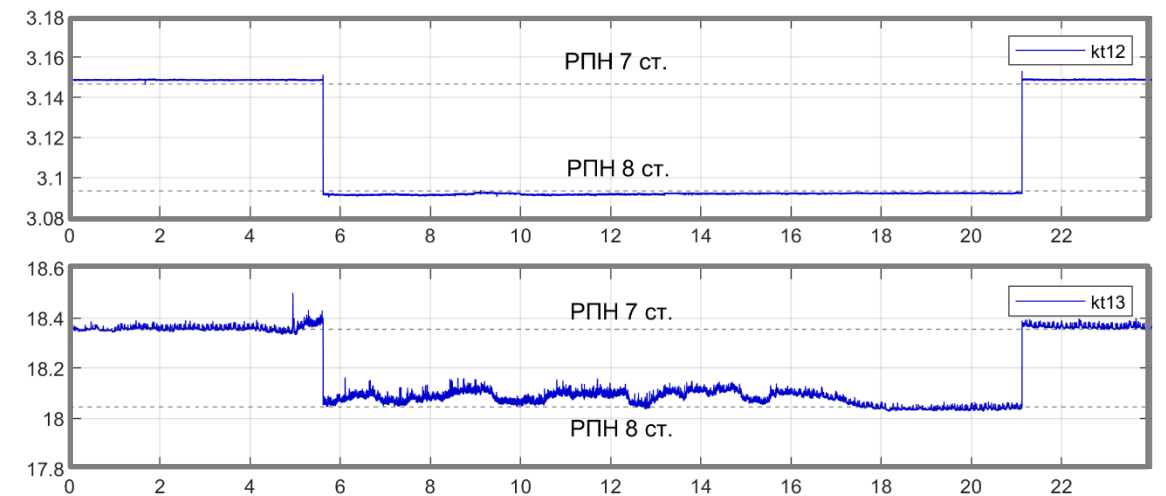


Рис.22 – Переключение ступени РПН



Теоретическая значимость работы:

- ❑ проведен анализ технического состояния и уровня автоматизации РС;
- ❑ разработаны математические модели СТ в синхровекторах процесса;
- ❑ получены алгоритмы защиты и мониторинга СТ на основе СВИ;
- ❑ разработана методика мониторинга состояния СТ;
- ❑ разработаны подходы к автоматизации центров питания РС на основе ЦПС и СВИ.

Практическая значимость работы:

- ❑ проведено виртуальное и физическое моделирование работы алгоритмов защиты и мониторинга СТ на основе измерений синхровекторов напряжения и тока;
- ❑ осуществлено внедрение в коммерческое производство устройства мониторинга СТ;
- ❑ проводится опытно-промышленная эксплуатация АСМД на основе СВИ;
- ❑ результаты моделирования и ОПЭ подтверждают перспективность и эффективность разработанных алгоритмов защиты и мониторинга СТ.



VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА

МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ

«Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики»

БЛАГОДАРИМ ЗА ВНИМАНИЕ!

Пискунов Сергей Александрович

инженер группы комплексного проектирования

ООО "Инженерный центр "Энергосервис"

аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

Северный (Арктический) федеральный университет

s.piskunov@ens.ru



Каталог

