



КАЗАНЬ, 1 – 3 ОКТЯБРЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ – 2025

ES инженерный центр
энергосервис

Совершенствование принципов настройки устройств РЗА на основе применения ЦТТНК

Шеметов Александр Юрьевич

Инженер отдела технической поддержки
ООО «Инженерный центр «Энергосервис»

Россия



Нормативные требования для ЦТН



- **Цифровые трансформаторы тока и напряжения** должны соответствовать:
 - ГОСТ Р МЭК 61869-6-2021. Трансформаторы измерительные. Часть 6. Дополнительные общие требования к маломощным измерительным трансформаторам (преобразователям);
 - IEC 61869-1:2023. Instrument transformers - Part 1: General requirements;
 - СТО 56947007-29.240.10.256-2018, «Технические требования к аппаратно-программным средствам и электротехническому оборудованию ЦПС», ПАО «ФСК ЕЭС»;
 - СТО 34.01-21-004-2019, «Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110-220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ», ПАО «Россети»;
 - СТО 56947007-29.240.10.299-2020, «Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС», ПАО «ФСК ЕЭС»;
 - СТО 56947007-25.040.30.309-2020, «Корпоративный профиль МЭК 61850», ПАО «ФСК ЕЭС»;
 - СТО 34.01-3.2-016-2022, «Цифровые трансформаторы тока 6–750 кВ. Общие технические условия», ПАО «Россети»;
 - СТО 34.01-3.2-017-2022, «Цифровые трансформаторы напряжения 6–750 кВ. Общие технические условия», ПАО «Россети».

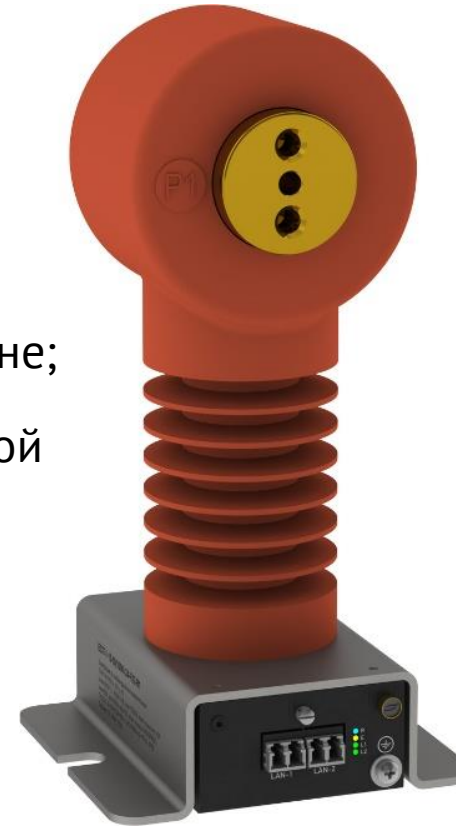




Преимущества цифровых трансформаторов



- Нет насыщения и остаточной намагниченности трансформаторов тока;
- Нет феррорезонанса трансформаторов напряжения;
- Уменьшение фазовой погрешности между сигналами тока и напряжения;
- Полная погрешность не зависит от вторичной нагрузки;
- Измерение напряжения и тока в широком частотном диапазоне;
- Повышение электробезопасности, обеспечение гальванической развязки;
- Снижение массы и габаритов;
- Упрощение монтажа и обслуживания;



ECIT-1
СИ № 94207-24



ECIT-2



ECIT-3



Цифровые трансформаторы тока и напряжения серии ECIT



Один типоразмер на широкий диапазон измерений в классе точности:

0,5 А – 1000 А, класс точности 0,5S/5PR до 20 кА

...заменяет традиционные трансформаторы с номинальными значениями от 50 А до 1000 А...

100 В – 17500 В, класс точности 0,5/3Р

...заменяет традиционные трансформаторы с номинальными значениями от $3000/\sqrt{3}$ В до $16000/\sqrt{3}$ В...



ECIT-1

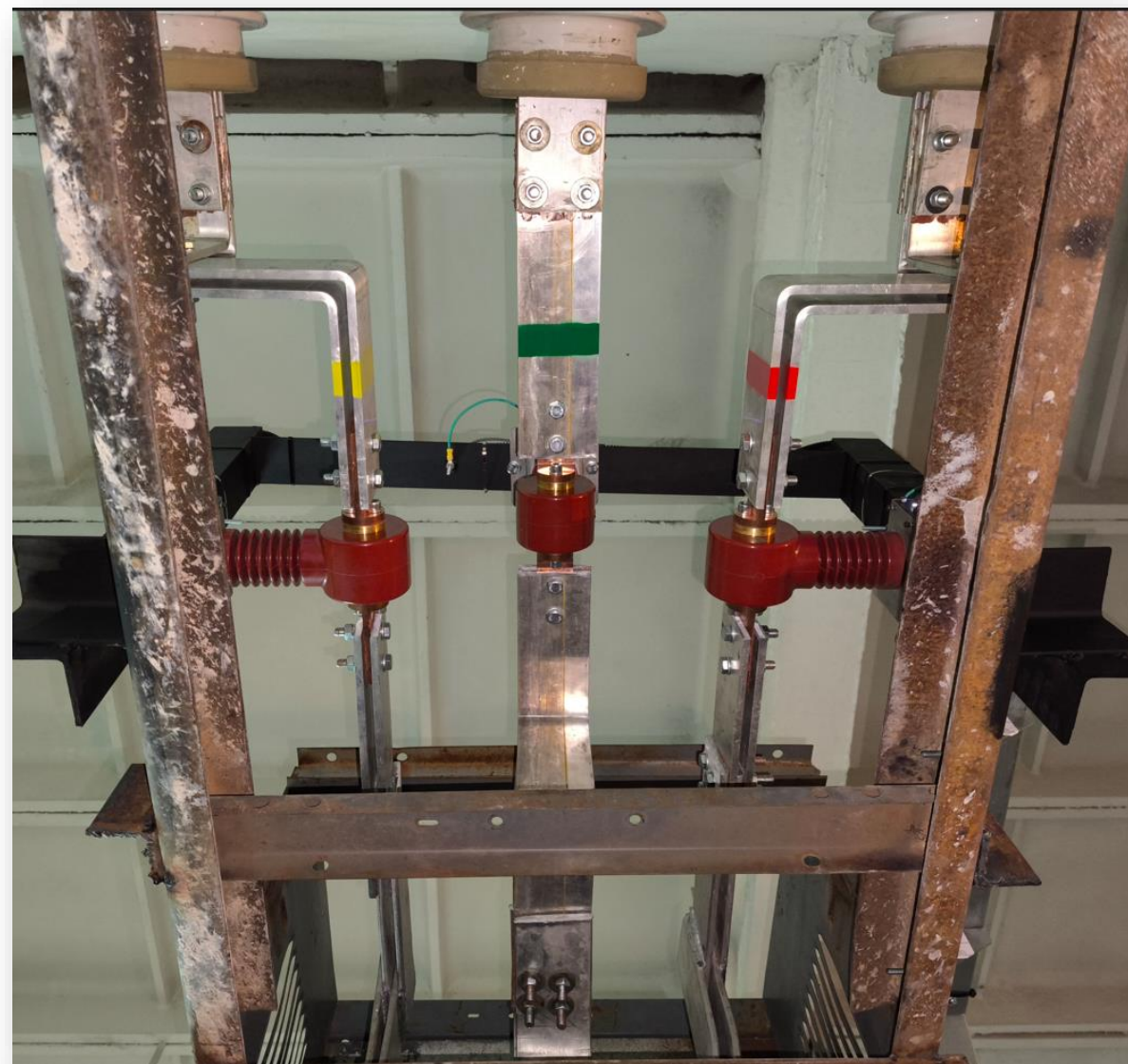
Наименование характеристики	Значение
Номинальная частота f , Гц	50
Класс напряжения, кВ	до 15
Наибольшее рабочее напряжение $U_{нр}$, кВ	17,5
Наибольший рабочий ток $I_{нр}$, А	1000
Ток секундной термической стойкости I_{th} , кА	20
Ток электродинамической стойкости I_{dyn} , кА	51
Количество измеряемых фаз	1
Тип входа синхронизации времени	1PPS, IRIG, PTP

Росреестр СИ 94207-24

Две цифровых шины стандарта 100Base-TX(FX), МЭК 61850-9-2
(профиль ПАО «Россети»)

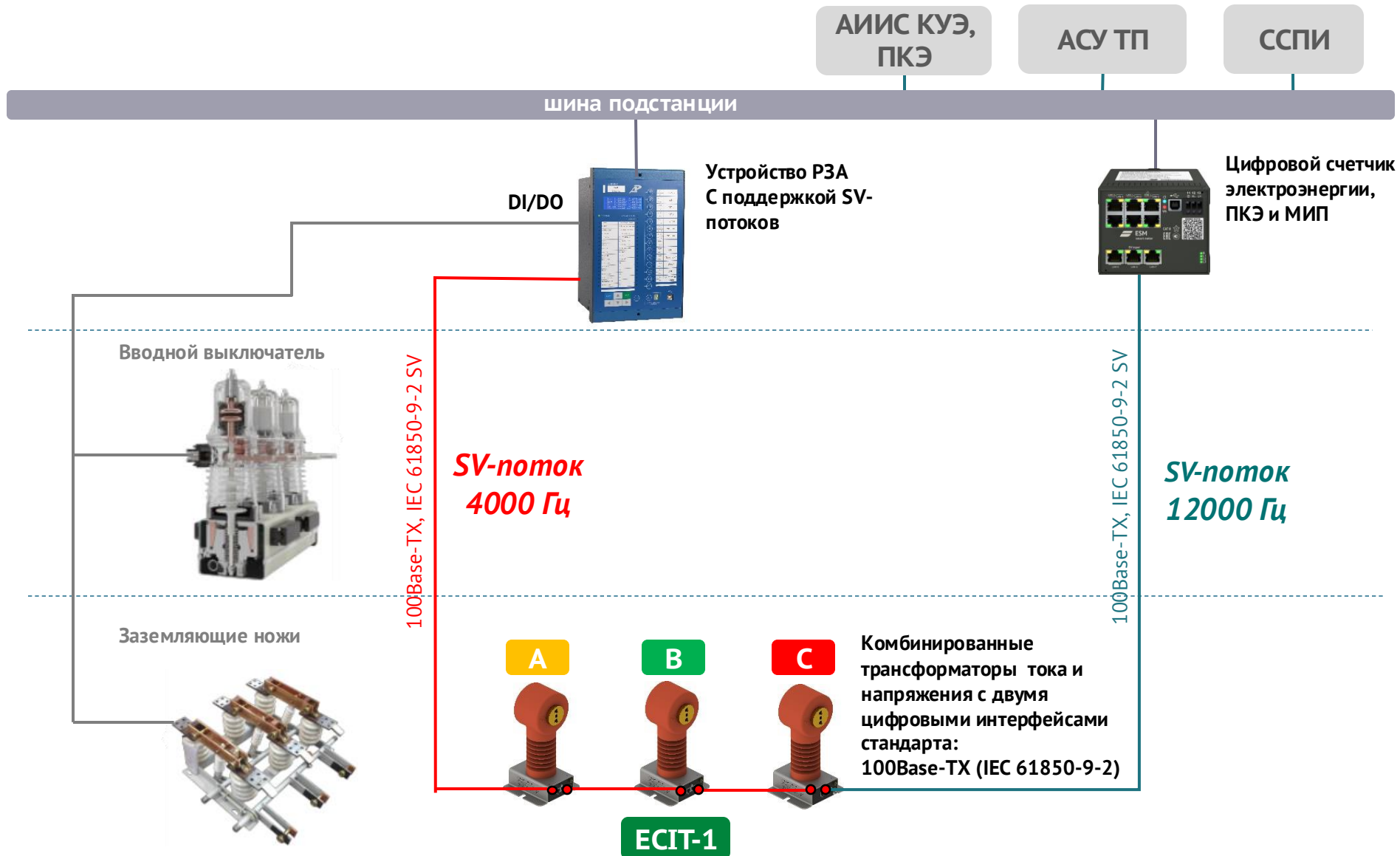


ПС «Орбита» 110/10 кВ





ПС «Орбита» 110/10 кВ





№ порта коммутатора	Устройство на порту	SV	APPID (hex)	VLAN Id (dec)	Назначение
Оптика					
1	ЕСИТ #1-1	SV80	4001	5	РЗА HH1
		SV240	4000	7	СМСТ HH1_1
2	ЕСИТ #1-2	SV80	4002	5	
		SV240	4000	8	СМСТ HH_2
3	ЕСИТ #1-3	SV80	4003	5	
		SV240	4000	9	СМСТ HH_3



Настройка защит



Коэффициенты трансформации в условиях применения цифровых трансформаторов тока

Параметр	Диапазон	Текущее значение
Группа 1		
Гр.1/Общие		
Уном НН1, кВ	6.0...110.0 (шаг 0.1)	6.0
Уном НН2, кВ	6.0...35.0 (шаг 0.1)	6.0
Ином пер. ВН, А	50...5000 (шаг 1)	300
Ином пер. СН, А	50...5000 (шаг 1)	1000
Ином пер. НН1, А	50...5000 (шаг 1)	1500
Ином пер. НН2, А	50...5000 (шаг 1)	1500
Ином втор. ВН, А	1, 5	5
Ином втор. СН, А	1, 5	1
Ином втор. НН1, А	1, 5	5
Ином втор. НН2, А	1, 5	5

EsConfigurator 1.0.1.11 (01.04.2025)

Файл Вид Сервис Справка

Идентифицировать

Прочитать

Записать

Номинальные значения ESM-SV:

Ток, А

50,000

Напряжение, В

10000,000

Вес кванта энергии, Вт·ч/вар·ч/ВА·ч

1

Внимание! При смене номинальных значений будут сброшены:

- показания энергии
- профили энергии
- срезы энергии

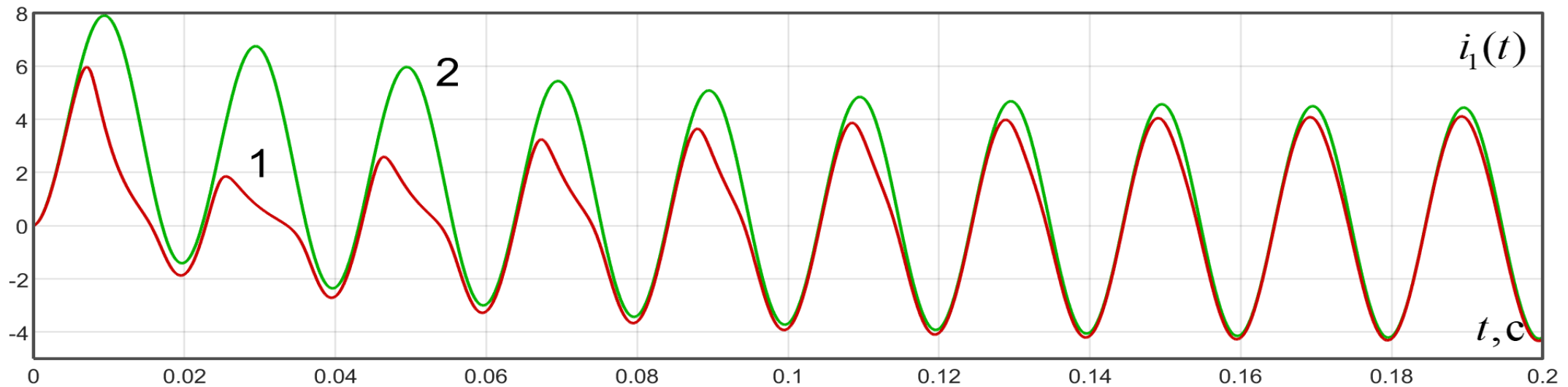


Настройка защит



Отстройка от тока небаланса для ДТО:

$$I_{нб1} = K_{отс} (K_{пер} \cdot K_{одн} \cdot \varepsilon + \Delta U_{рпн} + \Delta f_{доб}) I_{кз.вн}^{(3)}$$



Ток СТ при КЗ в обмотке ВН:

1 – э/м ТТ, 2 - ЦИТ

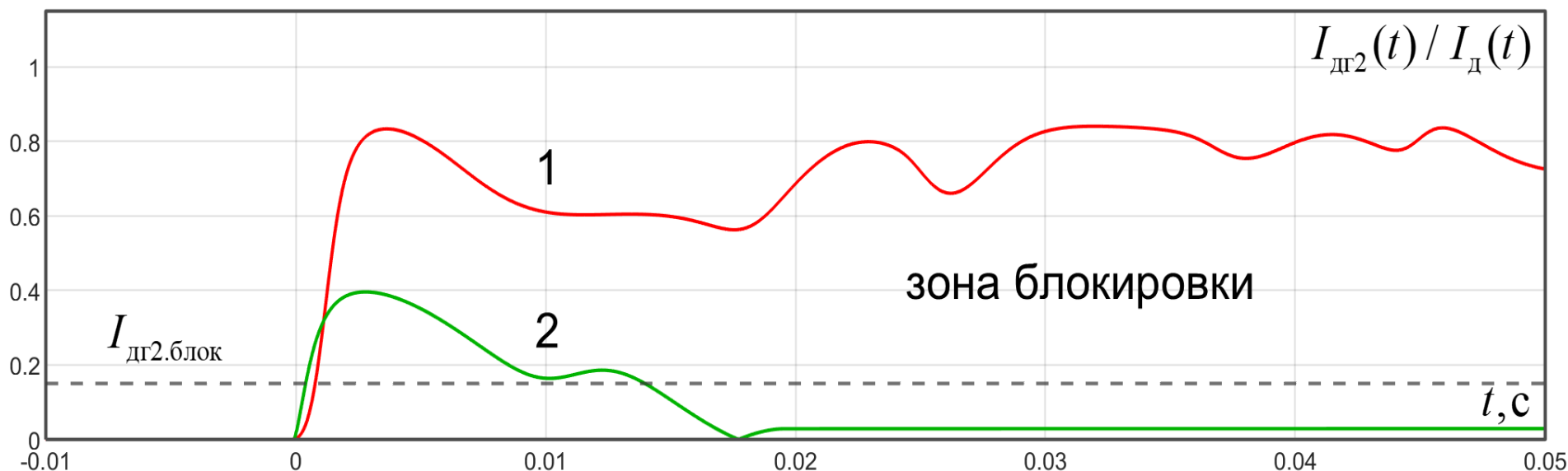


Настройка защит



Отстройка от броска тока намагничивания:

$$I_{сз} = K_{отс} \cdot I_{бтн} = 3 \div 7 \cdot \frac{S_{ном.прох}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}$$



Относительная величина второй гармоники тока СТ при КЗ в обмотке ВН:

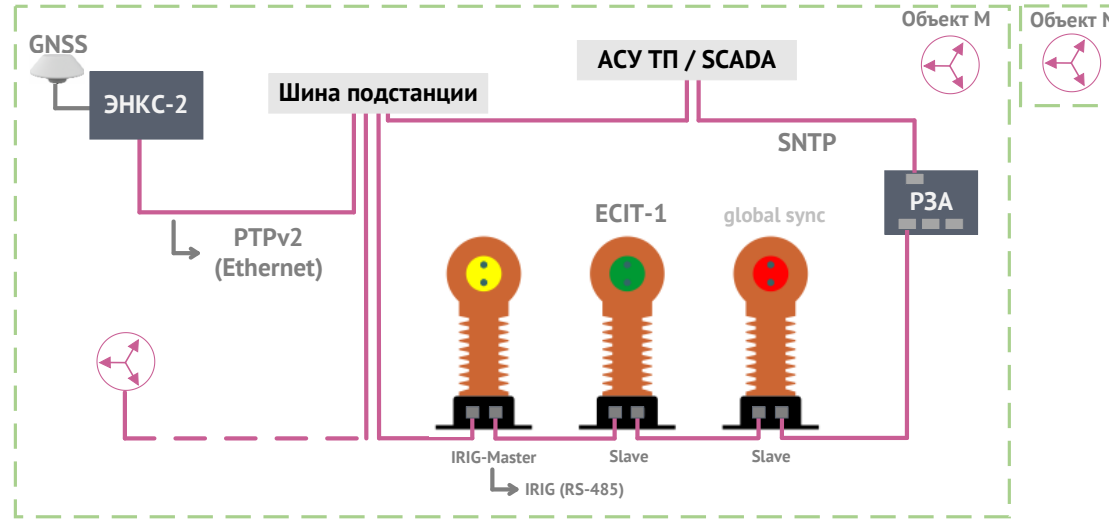
1 – э/м ТТ, 2 - ЦИТ



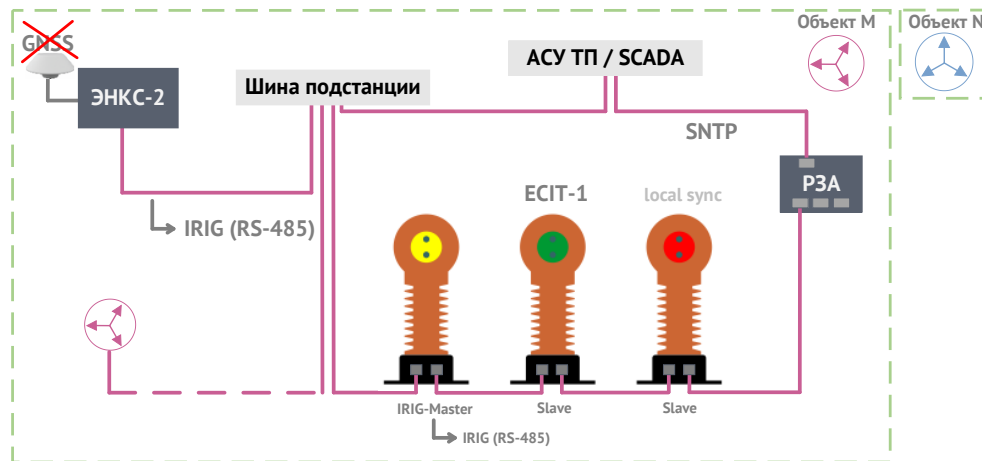
Синхронизация времени



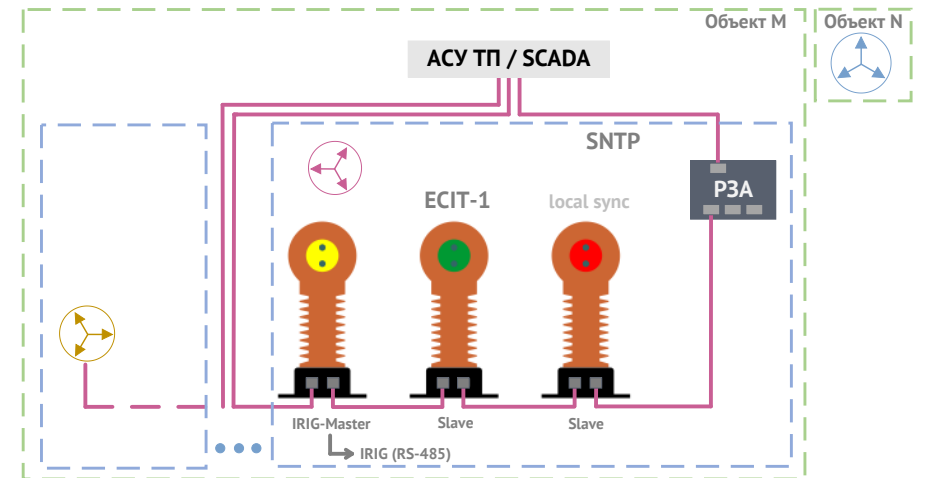
Глобальное время (UTC) – global sync



Локальное время объекта – local object sync



Локальное время присоединения – local node sync





Проблемы существующих РЗА



№ порта коммутатора	Настройк и порта	Устройство на порту	SV	svID	dest. MAC (hex)	APPID (hex)	VLAN Id (dec)	Назначение
Оптика	VLAN							
1	U, 5, 7	ЕСИТ #1-1	SV80	MU01	01:0C:CD:04:00:03	4001	5	РЗА НН1
			SV240	MU01_1	01:0C:CD:04:00:07	4000	7	СМСТ НН1_1
2	U, 5, 8	ЕСИТ #1-2	SV80	MU01	01:0C:CD:04:00:04	4002	5	
			SV240	MU01_2	01:0C:CD:04:00:08	4000	8	СМСТ НН_2
3	U, 5, 9	ЕСИТ #1-3	SV80	MU01	01:0C:CD:04:00:04	4003	5	
			SV240	MU01_3	01:0C:CD:04:00:09	4000	9	СМСТ НН_3
4	U, 6, 10	ЕСИТ #2-1	SV80	MU02	01:0C:CD:04:00:05	4011	6	РЗА НН2
			SV240	MU02_1	01:0C:CD:04:00:0A	4000	10	СМСТ НН2_1
5	U, 6, 11	ЕСИТ #2-2	SV80	MU02	01:0C:CD:04:00:06	4012	6	
			SV240	MU02_2	01:0C:CD:04:00:0B	4000	11	СМСТ НН2_2
6	U, 6, 12	ЕСИТ #2-3	SV80	MU02	01:0C:CD:04:00:06	4013	6	
			SV240	MU02_3	01:0C:CD:04:00:0C	4000	12	СМСТ НН2_3
7	U, 3, 4	ЗОБ	SV80	T06224SV80	01:0C:CD:04:00:01	4000	3	РЗА ВН
			SV256	T06224SV256	01:0C:CD:04:00:02	4000	4	СМСТ ВН
8	-	-	-	-	-	-	-	-

EsConfigurator 1.0.1.12 (02.09.2025)

Файл Вид Сервис Справка

Идентифицировать Прочитать Записать

Интерфейс LAN 1

Тип потока Объединяющий

MAC-адрес объединения 4-00-02

5-й байт HEX

6-й байт 02 HEX

APPID ч.2 4001 HEX

APPID ч.3 4003 HEX

Параметры в потоке:

Изм

Изм

Изм д

Изм д

У

Твнутр.

Твнешн.

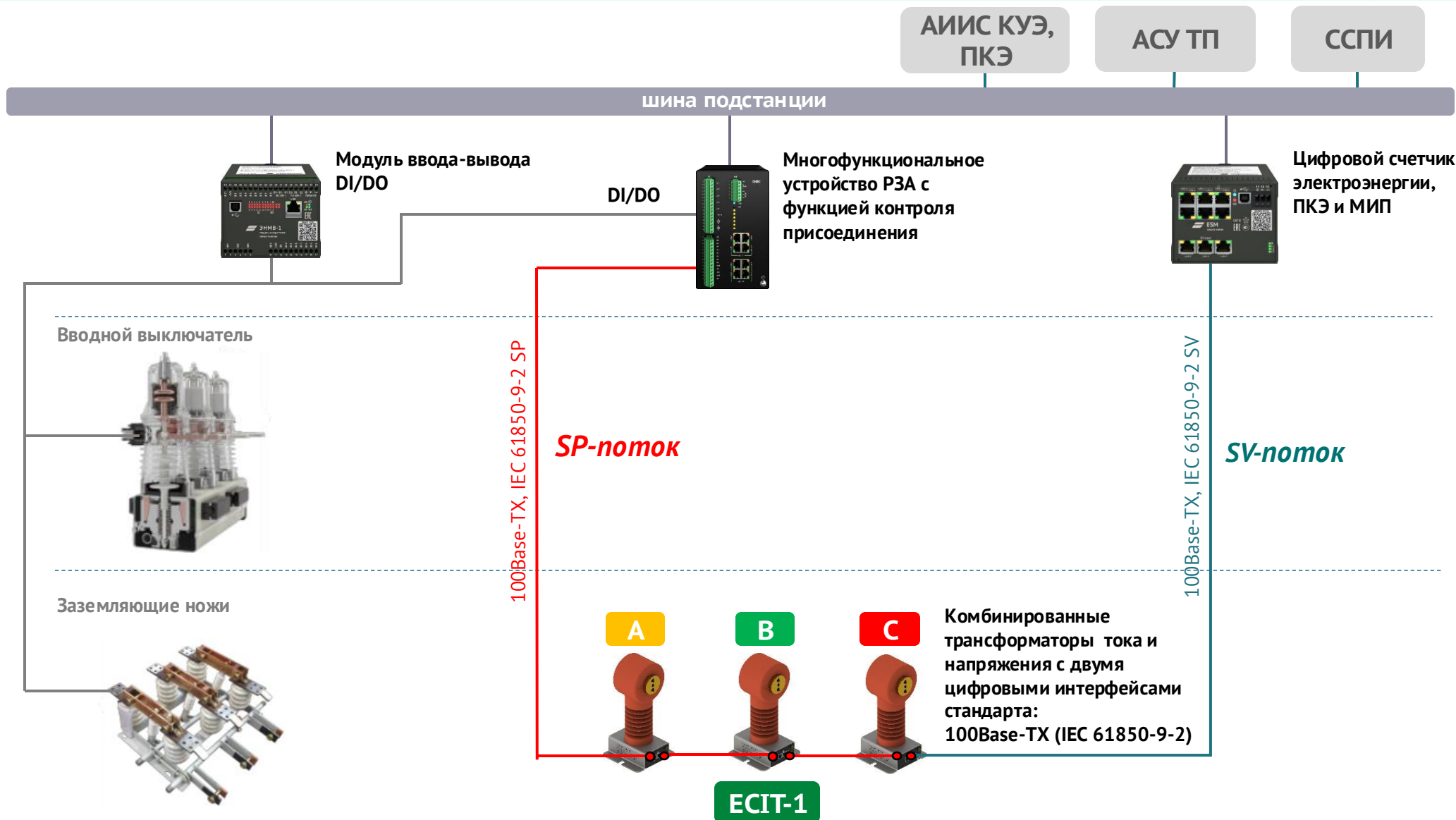
У +12

У -12

Ч.2, параметр. 1



Передача SV и SP-поток





Синхровекторы и учёт ЭЭ



```
▼ savPdu
  noASDU: 1
  ▼ seqASDU: 1 item
    ▼ ASDU
      svID: 0123456789
      smpCnt: 1
      confRev: 1
      smpSynch: local (1)
      ▼ PhsMeas1
        value: 1084266071
        > quality: 0x00000000, validity: good,
        value: 1124079662
        > quality: 0x00000000, validity: good,
        value: 1084185385
```



```
ENS-SP
APPID: 0x4000
Length: 108
Reserved 1: 0x0000
Reserved 2: 0x0000
▼ savPdu:
  noASDU: 1
  ▼ seqASDU: 1 items
    ▼ ASDU:
      svID: 0123456789
      smpCnt: 1
      confRev: 1
      local (1)
      ▼ PhsMeas1:
        amplitude: 5,01835
        quality: Good (0)
        angle: 128,094
        quality: Good (0)
        amplitude: 4,97988
```

ECIT

Инфо

Измерения

Диагностика

Архив ТС

Архив UI

Осциллограммы

Журнал

EN

Обновлено в 27.08.2025, 16:09:36

Вид: [Трёхфазный](#) Автообновление: [Вкл.](#)

Синхровекторы

27.08.2025, 13:09:36.976 (UTC) синхр. (global)

<input checked="" type="checkbox"/> \dot{U}_a , В	100.694	$\angle 221.823^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{U}_b , В	5991.124	$\angle 102.720^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{U}_c , В	6041.617	$\angle 342.256^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{I}_a , А	7.0753	$\angle 267.504^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{I}_b , А	490.4020	$\angle 146.895^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{I}_c , А	495.5491	$\angle 27.508^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{U}_{ab} , В	6040.755	$\angle 101.885^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{U}_{bc} , В	10444.930	$\angle 312.626^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{U}_{ca} , В	6093.222	$\angle 163.073^\circ$
<input type="checkbox"/> \dot{I}_0 , А	163.5166	$\angle 86.687^\circ$
<input type="checkbox"/> \dot{I}_1 , А	330.9814	$\angle 267.201^\circ$
<input type="checkbox"/> \dot{I}_2 , А	160.4713	$\angle 87.738^\circ$
<input type="checkbox"/> \dot{U}_0 , В	1957.887	$\angle 42.072^\circ$
<input type="checkbox"/> \dot{U}_1 , В	4044.442	$\angle 222.482^\circ$
<input type="checkbox"/> \dot{U}_2 , В	1985.979	$\angle 42.919^\circ$

Энергии

27.08.2025, 13:09:36 (UTC)

WaP+, Вт·ч	14976
WaP-, Вт·ч	135
WaQ+, вар·ч	484
WaQ-, вар·ч	3224
27.08.2025, 13:09:36 (UTC)	
WbP+, Вт·ч	4904
WbP-, Вт·ч	871
WbQ+, вар·ч	417
WbQ-, вар·ч	4014
27.08.2025, 13:09:36 (UTC)	
WcP+, Вт·ч	4214
WcP-, Вт·ч	935
WcQ+, вар·ч	1382
WcQ-, вар·ч	2827
27.08.2025, 13:09:36 (UTC)	
WP+, Вт·ч	24094
WP-, Вт·ч	1941
WQ+, вар·ч	2283
WQ-, вар·ч	10065

Дискретные сигналы

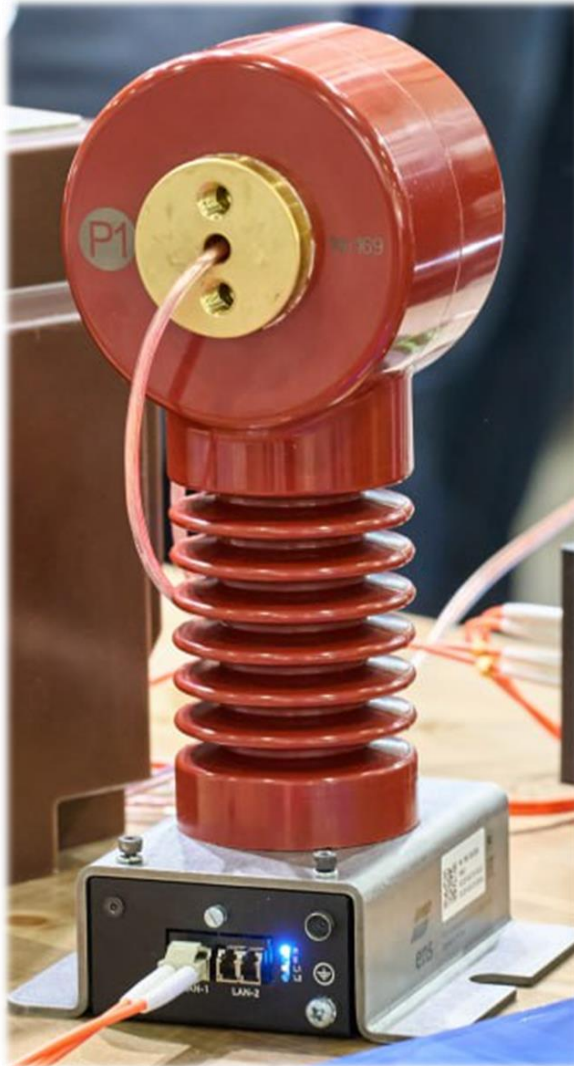
Токовая отсечка (ТО) 1	ПУСК	СРАБ
Токовая отсечка (ТО) 2	ПУСК	СРАБ
Макс. токовая защита (МТЗ) 1	ПУСК	СРАБ
Макс. токовая защита (МТЗ) 2	ПУСК	СРАБ
Сбой питания		
Запись осциллограммы	ОТКЛ	
Выход реле	ОТКЛ	



Функции РЗА в трансформаторах ЕСИТ



ЕСИТ-1



Релейная защита

Токовая отсечка (ТО)

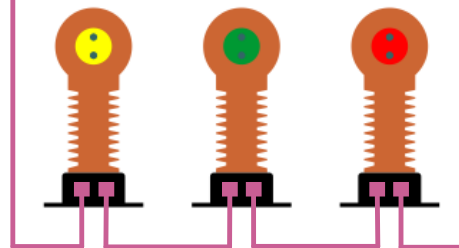
Максимальная токовая защита (МТЗ)

Запись осциллограмм аварийных событий

Регистрация аварийных событий (журналы аварий)

Кольцевая топология (RSTP)

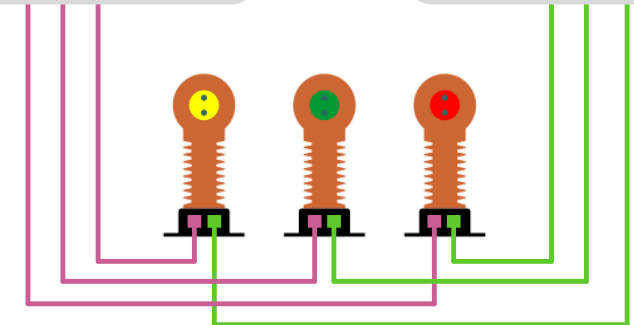
Шина процесса LAN



Параллельное резервирование (PRP)

Шина процесса LAN-A

Шина процесса LAN-B





Функции РЗА в трансформаторах ЕСИТ



ЕСИТ в режиме Master обеспечивает релейную защиту присоединения:

МФТО	Междуфазная токовая отсечка
МТЗ	Максимальная токовая защита
МТЗ/U	Максимальная токовая защита с пуском по напряжению
НМТЗ	Направленная МТЗ
ЗОЗЗ	Защита от однофазных замыканий на землю
НЗОЗЗ	Направленная защита от замыканий на землю
ЗОП	Защита от обрыва провода
ЗПН	Защита от повышения напряжения
ЗМН	Защита минимального напряжения
ЗДЗ	Защита от дуговых замыканий (датчики дуги AFS по GOOSE от ЭНМБ-1)
ЛЗШ	Логическая защита шин (GOOSE-сообщения)
УРОВ	Резервирование отказа выключателя (GOOSE-сообщения)





ECIT

- Измерения
- LAN 1
- LAN 2
- Резервирование
- Часы
- МЭК 61850
 - МЭК 61850-9-2
 - SV 1
 - SV 2
 - SP
 - МЭК 61850-8-1 GOOSE
- Уставки
 - TO 1
 - TO 2
 - MT3 1
 - MT3 2
- Осциллограммы

☒ Включена

☒ Замкнуть реле при срабатывании

Значение ▼

Порог включения ▲▼

Задержка, мс ▲▼

Порог отключения ▲▼



ECIT

Инфо

Измерения

Диагностика

Архив TC

Архив UI

Осциллограммы

Журнал

EN

№ 251

Прочитано 2316 записей в 27.08.2025, 16:12:31

Экспорт в CSV ↓

☒ Подробный

Обновить ○

№	Дата (UTC)		TO 1 Пуск	TO 1 Сраб.	TO 2 Пуск	TO 2 Сраб.	МТЗ 1 Пуск	МТЗ 1 Сраб.	МТЗ 2 Пуск	МТЗ 2 Сраб.	Сбой питания	Запись осц.
1214	27.08.2025, 13:08:47.382083	синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1213	27.08.2025, 13:07:50.265416	синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1212	27.08.2025, 13:07:49.154791	синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1211	27.08.2025, 12:12:18.570208	синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1210	27.08.2025, 12:12:14.745625	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1209	27.08.2025, 12:08:46.759791	синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ОТКЛ
1208	26.08.2025, 11:15:00.731041	синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1207	26.08.2025, 11:14:55.109583	синхр.	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1206	26.08.2025, 11:14:51.198125	синхр.	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ
1205	26.08.2025, 11:14:51.197916	синхр.	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1204	26.08.2025, 10:20:10.440208	синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1203	26.08.2025, 10:17:06.470208	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1202	26.08.2025, 10:17:04.109166	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1201	26.08.2025, 10:17:04.108541	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1200	26.08.2025, 10:17:04.108333	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1199	26.08.2025, 10:17:04.108333	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1198	26.08.2025, 10:17:04.108125	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1197	26.08.2025, 10:17:04.108125	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1196	26.08.2025, 10:17:04.107916	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1195	26.08.2025, 10:17:04.107916	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1194	26.08.2025, 10:17:04.104791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1193	26.08.2025, 10:17:04.104791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1192	26.08.2025, 10:17:04.094791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1191	26.08.2025, 10:17:04.094791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1190	26.08.2025, 10:17:04.089791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1189	26.08.2025, 10:17:04.089791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1188	26.08.2025, 10:17:04.044791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1187	26.08.2025, 10:17:04.044791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1186	26.08.2025, 10:17:04.039791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ
1185	26.08.2025, 10:17:04.039791	не синхр.	ОТКЛ	ОТКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ	ОТКЛ



Функции диагностики и тестирования в ЦТНК



■ Выдача с РЕТОМ

Ток

РЕТОМ-71[637] Группа 1

Управление

	Ток	Угол	Частота
1A	10,000 A	0,000 °	50,000 Гц
1B	10,000 A	0,000 °	50,000 Гц
1C	10,000 A	0,000 °	50,000 Гц

РЕТОМ-71[637] Группа 2

Напряжение

РЕТОМ-71[637] Группа 1

Управление

	Напряжение	Угол	Частота
1A	100,000 В	0,000 °	50,000 Гц
1B	100,000 В	240,000 °	50,000 Гц
1C	100,000 В	120,000 °	50,000 Гц

РЕТОМ-71[637] Группа 2

■ Установление тест-режима ЕСИТ

Коэффициенты для Test mode:

Ток 120,000

Напряжение 10,000

Прибор ЕСИТ

Режим Тест (вкл./откл.)

☐ Включить для SV1

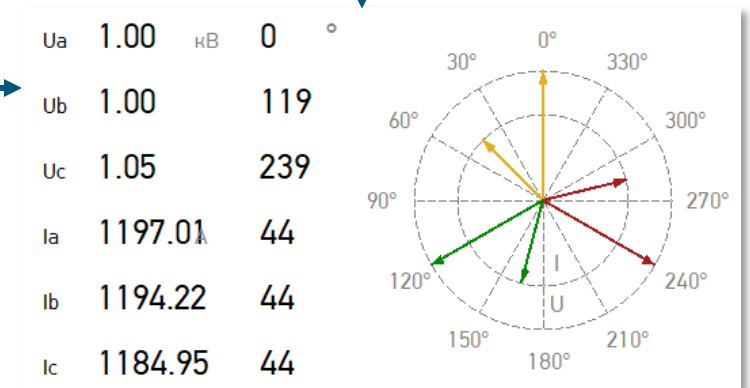
☐ Включить для SV2

☒ Включить для SP

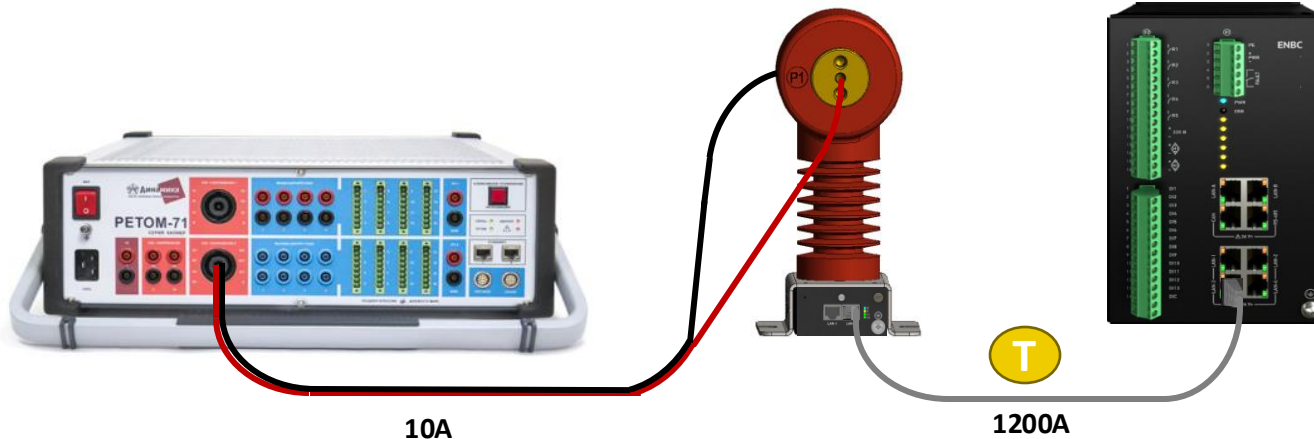
■ Проверка защит

Уставки:

Группа	Ток срабатывания, А	Задержка срабатывания, мс	Характеристика срабатывания
1	1080	200	IEC DEFINITE TIME
2	100	0	IEC DEFINITE TIME
3	100	0	IEC DEFINITE TIME

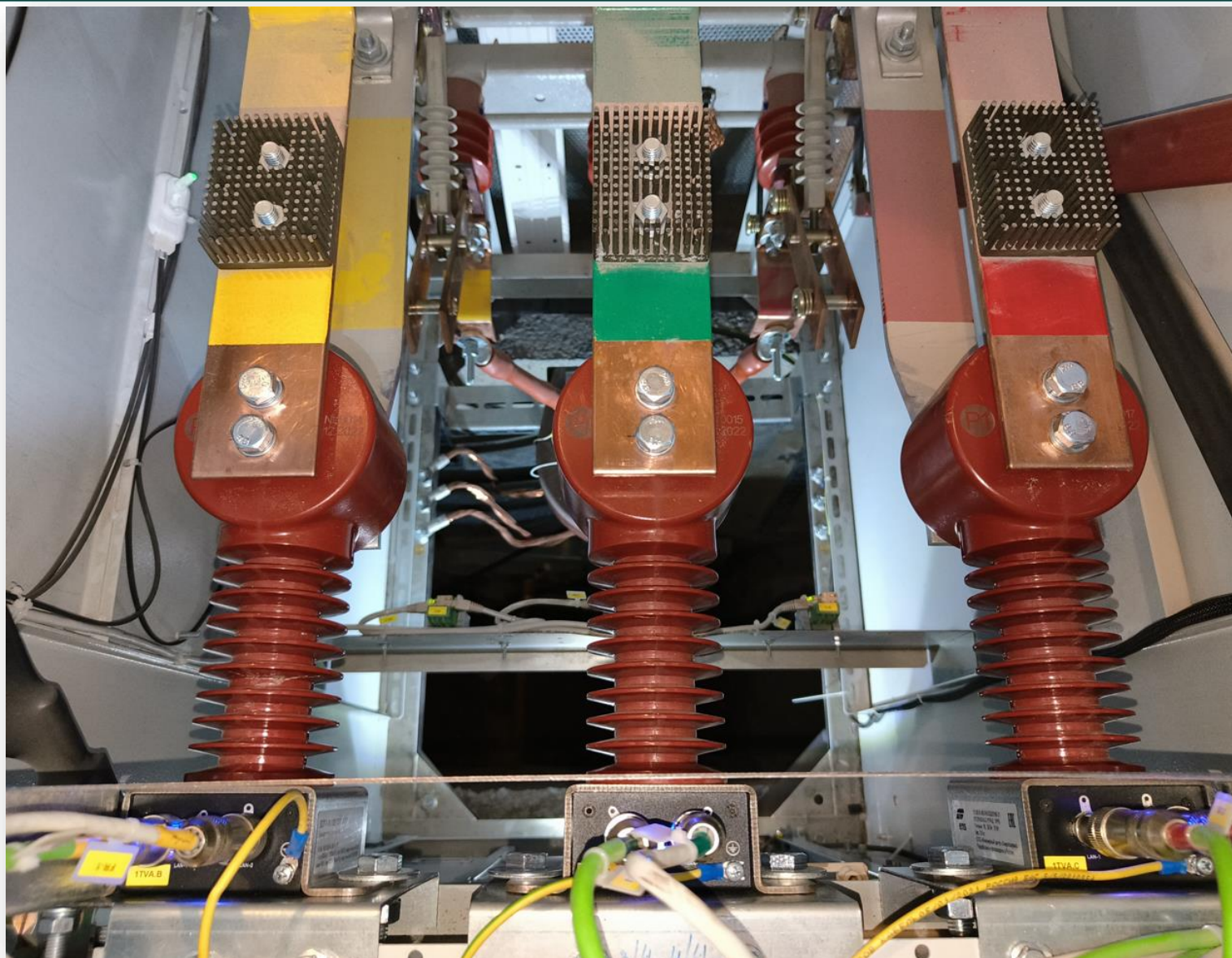


Сработала
ТС3-1
16.06.2025 16:50:56.786





Заклучение





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Шеметов Александр Юрьевич
ООО «Инженерный центр «Энергосервис»
a.shemetov@ens.ru



Совершенствование принципов настройки устройств РЗА на основе применения цифровых измерительных трансформаторов напряжения и тока

**А.Ю. Шеметов¹, П.В. Сеитов¹, Р.С. Плакидин¹, С.А. Пискунов^{1,2}, Д.Н. Ульянов^{1,2},
А.В. Мокеев^{1,2}**

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

цифровые измерительные трансформаторы, устройство РЗА, расчет уставок, коэффициент трансформации, МЭК 61850-9-2

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и внедрение современных первичных измерительных преобразователей (электронных и цифровых измерительных трансформаторов напряжения и тока) позволяет повысить эффективность работы систем релейной защиты и мониторинга состояния первичного оборудования электрических станций и подстанций. Развитие коммуникационных технологий обеспечивает условия для совершенствования методов параметрирования, проверки корректности работы устройств РЗА и других интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), используемых для создания нового поколения автоматизированных систем на базе серии стандартов МЭК 61850.

Доклад представляет опыт применения цифровых измерительных трансформаторов напряжения и тока компании ООО «Инженерный центр «Энергосервис» для разработки и реализации пилотного проекта систем релейной защиты и мониторинга состояния силового трансформатора понизительной подстанции 110/10 кВ.

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Под цифровыми измерительными трансформаторами, как правило, подразумеваются измерительные устройства, предназначенные для подключения к первичным цепям силового электрооборудования и передающим полученные значения измеренных параметров в цифровом виде по установленному протоколу, например, МЭК 61850 9-2, с помощью встроенных интерфейсов, чаще всего Ethernet. Подобные устройства могут использовать различные физические принципы, например принцип работы трансформатора тока без ферромагнитного сердечника (катушка Роговского), гальваномагнитные явления (эффект Холла), магниторезистивные и оптические эффекты. В настоящем докладе рассматриваются измерительные трансформаторы, основанные на магнитооптическом эффекте Фарадея и катушке Роговского (рис.1).



Рис. 1: Комбинированные измерительные трансформаторы тока и напряжения ЕСИТ-1 на стендовых испытаниях

Современные цифровые измерительные трансформаторы — это сложные устройства, сочетающие в себе комбинацию аналоговых сенсоров, датчиков и электронных компонентов [1, 2]. Внедрение подобных устройств позволяет получить новое качество измерений параметров электрической сети, обеспечивающих возможность разработки новых [3] и совершенствования существующих алгоритмов защиты, повышающих эффективность устройств РЗА.

Внедрение цифровых измерительных трансформаторов (далее ЦИТ) имеет следующие преимущества по сравнению с применением э/м измерительных трансформаторов:

- отсутствие эффектов насыщения, феррорезонанса и остаточной намагниченности;
- измерение напряжения и тока в широком частотном диапазоне;
- меньшие затраты на обслуживание;
- компактные габариты и малый вес.

Перечисленные выше особенности позволяют применять одну и ту же модификацию ЦИТ на присоединениях с различными рабочими значениями тока и напряжения, оставаясь при этом в заявленном классе точности измерений. Это свойство цифровых трансформаторов кардинально упрощает методику выбора измерительных трансформаторов и исключает ошибки на этапе проектирования электроустановки.

Методики настройки устройств РЗА для ЦИТ не зависят от условий насыщения магнитопровода ТТ, как в случае с традиционными ТТ при высоком уровне апериодической составляющей и высших гармоник. Также не требуется учитывать в расчетах уставок устройств РЗА коэффициенты трансформации ТТ и ТН (для ЦИТ они просто отсутствуют), а также время до насыщения, предельную кратность ТТ и т.п. Данный факт повышает надежность РЗА, исключая ошибки на этапе проектирования электроустановки, а также на этапах ПНР и ТОиР.

ЦИТ требуют меньше затрат на обслуживание, благодаря конструктивным особенностям и наличию непрерывной самодиагностики, в частности, контроля за точностью измерений, нагревом токопровода, состоянием внутренней изоляции и уровня ЧР. ПНР и техническое обслуживание цифровых трансформаторов и РЗА не требует разборки первичных и вторичных цепей. Это снижает временные затраты и вероятность ошибки, что повышает надежность эксплуатации.

ЦИТ более компактны и легковесны, требуют меньший объем вторичных проводников (все сигналы передаются по стандартному оптоволоконному кабелю/сети Ethernet). Как следствие – простота и универсальность в установке (монтаж на шине, горизонтальный монтаж или непосредственная установка на автоматические выключатели), а также простота в модернизации.



ЦИТ, как правило, экологичнее и безопаснее. Риск взрыва сведен к минимуму. В конструкции цифровых трансформаторов не используется масло и SF₆, следовательно, намного проще утилизация по окончании срока службы. ЦИТ использует меньше материалов по сравнению с обычными трансформаторами, что в свою очередь так же снижает транспортные расходы.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ РЗА

Принципы работы рассматриваемых цифровых измерительных трансформаторов напряжения и тока позволяют пересмотреть порядок расчетов в проектной документации, связанных со стандартными требованиями к ТТ [4-5]. В настоящее время существуют рекомендации по применению оптических (т.е. без эффекта насыщения магнитопровода) ТТ в определенных случаях для объектов 110 кВ [6], расположенных вблизи источников генерации с большими апериодическими составляющими, что обуславливает возможное насыщение электромагнитных (далее э/м) ТТ. В свою очередь, в рамках выполнения пилотного проекта не потребовалось уточнять у производителя примененного терминала РЗА минимального необходимого времени до насыщения ТТ ($t_{\text{пз}}$) при коротких замыканиях, поскольку в ЦИТ данный эффект отсутствует.

В ходе выполнения пилотного проекта компанией был произведен расчет уставок дифференциальной защиты силового трансформатора в соответствии с действующей методикой производителя примененного терминала РЗА.

Традиционно расчет уставок дифференциальной защиты силового трансформатора (далее СТ) с торможением производится на основе известных величин внешнего тока КЗ на шинах низшего напряжения, расчетного броска намагничивающего тока (БНТ) и параметров измерительной системы РЗА (пределов допустимой погрешности ТТ, их однотипности, учета работы устройства РПН и погрешности измерений цифрового устройства РЗА). Как правило, в случае применения э/м ТТ производится расчет параметров срабатывания дифференциальной защиты СТ, приведенный к номинальному току вторичной обмотки измерительных ТТ:

$$I_{\text{НОМ.ВТОР.}} = \frac{I_{\text{НОМ.ПЕРВ.}} \cdot k_{\text{сх}}}{K_I}, \quad (1)$$

где K_I – коэффициент трансформации ТТ (ВН/НН1/НН2);

$k_{\text{сх}}$ – коэффициент схемы, учитывающий схему соединения вторичных обмоток ТТ.

Рассматриваемый подход [7] существует достаточно давно и, в первую очередь, предназначен для измерительных каналов, образованных с помощью традиционных электромагнитных измерительных трансформаторов. В пилотном проекте коэффициент трансформации и схему соединения обмоток ТТ пришлось вводить виртуально, поскольку данная процедура предполагается для корректной настройки терминала РЗА (см. рис. 2). При этом значения коэффициентов могут выбираться произвольно при условии, что для всех расчетов используются одинаковые значения.

Параметр	Диапазон/Значения	Текущее
Группа 1		
Гр. 1/Общие		
Уном НН1, кВ	[6,0 - 110,0]	6
Уном НН2, кВ	[6,0 - 35,0]	6
Ином пер. ВН, А	[50 - 5000]	300
Ином пер. СН, А	[50 - 5000]	1500
Ином пер. НН1, А	[50 - 5000]	1500
Ином пер. НН2, А	[50 - 5000]	1500
Ином втор. ВН, А	(1, 5)	5
Ином втор. СН, А	(1, 5)	1
Ином втор. НН1, А	(1, 5)	5
Ином втор. НН2, А	(1, 5)	5

Рис. 2: Установка номинальных значений для терминала РЗА с возможностью приема SV



Указанная особенность настройки устройства РЗА связана с общей унификацией решений производителей. Опыт применения ЦИТ в пилотном проекте показывает, что часть настроек устройства РЗА может быть упрощена в связи с тем, что на входе устройство защиты получает первичные значения оцифрованных значений тока и напряжения. Таким образом, данную часть настроек можно было бы исключить или добавить в инструменты для конфигурирования несколько вариантов отображения вводимых настроек. Наша компания в своей линейке продукции имеет multifunctional измерительное устройство, у которого могут быть модификации как с аналоговыми входами, так и с цифровыми, работающими с SV-потоками, принимаемыми в соответствии с [9] и [10]. Поэтому для версии с SV была отключена настройка значений коэффициентов трансформации ТТ и добавлен новый параметр – номинальное значение по току и напряжению для контролируемого присоединения (см. рис. 3) [8]. Таким образом у пользователя устройства нет необходимости настройки коэффициентов, которые физически в схеме измерительного канала отсутствуют. Аналогично выполняется настройка и с другими датчиками и сенсорами, применяемыми для измерений первичных значений напряжения и тока, например, датчиков, выдающих измерения в аналоговом виде. В этом случае обеспечивается возможность для эксплуатации видеть в настройках устройств РЗА реальные паспортные значения таких датчиков, а не некие «виртуальные» сущности.

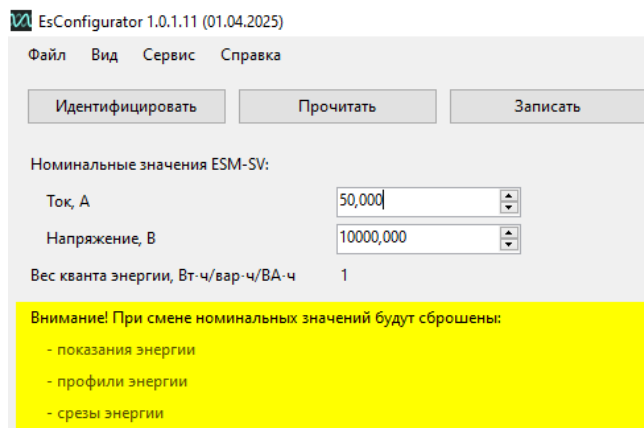


Рис. 3: Установка номинальных значений для МИУ ESM с возможностью приёма SV

Результаты применения ЦИТ в пилотном проекте в составе измерительной системы устройства РЗА силового понижающего трансформатора 110/10 кВ с расщепленной обмоткой НН подтверждают их преимущества для повышения быстродействия и чувствительности дифференциальной защиты силового трансформатора. При решении данной задачи можно выделить несколько основных направлений, характеризующих преимущества ЦИТ перед э/м ТТ.

В традиционном исполнении продольная дифференциальная защита СТ имеет быстродействующую ступень (дифференциальную токовую отсечку) и чувствительную ступень с торможением. Дифференциальная защита отстраивается от токов небаланса, возникающих при протекании сквозных токов СТ и БНТ. Для ДТО производится расчет тока небаланса, возникающего при протекании сквозного тока КЗ на шинах НН:

$$I_{нб1} = K_{отс} \left(K_{пер} K_{одн} \varepsilon + \Delta U_{рпн} + \Delta f_{доб} \right) I_{кз.вн}^{(3)}, \quad (2)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий переходный режим; ε – относительное значение полной погрешности ТТ, $\Delta U_{рпн}$ – слагаемое, учитывающее наличие РПН, $\Delta f_{доб}$ – слагаемое, учитывающее погрешность устройства РЗА.

Кроме того, ДТО отстраивается от тока БНТ $I_{нб2}$, т.е. при расчете уставки учитывается максимальное из значений $I_{нб1}$ и $I_{нб2}$. Составляющая тока небаланса $I_{нб2}$, как правило, принимается равной $I_{нб2} = 6I_{ном}$, где $I_{ном}$ – номинальный ток силового трансформатора.

При расчете тормозной характеристики также учитывается составляющая тока небаланса $I_{нб1}$, зависящая от сквозного тока СТ. Отсюда следует, что быстродействие и чувствительность дифференциальной защиты СТ при различных видах повреждений напрямую зависят от характеристик установленных трансформаторов тока.



Отсутствие эффектов насыщения и остаточной намагниченности ЦИТ позволяет снизить расчетные значения токов небаланса защиты, и следовательно, улучшить ее характеристики. Например, фактическая погрешность измерений канала тока ЦИТ в рассматриваемом пилотном проекте для релейной защиты не превышает погрешность, соответствующую классу точности 0,5 для измерений, что существенно меньше чем задаваемая погрешность ε для э/м ТТ классов точности 5Р и 10Р. Кроме того, для ЦИТ отсутствует необходимость введения понятия однотипности в связи с отсутствием ферромагнитного сердечника. Таким образом, для цифровых ТТ выполняется условие $K_{\text{одн}} = 0,5$. Поэтому выбор уставки ДТО фактически ограничен только расчетной величиной тока БНТ.

Благодаря применению цифровой обработки сигнала и специализированных фильтров в ЦИТ [11] также могут быть уменьшены расчетные коэффициенты ДЗТ, связанные с апериодичностью формы тока КЗ $K_{\text{пер}}$ и тока БНТ $I_{\text{нб2}}$. Отсутствие насыщения ЦИТ облегчает условия для реализации как классических принципов блокировки ДЗТ при БНТ, например, по относительной величине второй гармоники тока СТ, так и новых принципов, например, на основе оценки параметров силового трансформатора [11].

В качестве примера, демонстрирующего преимущества применения ЦИТ для дифференциальной защиты СТ, рассмотрим опыт моделирования КЗ в обмотке ВН силового трансформатора. Расчетные модели трансформатора и сети, выполненные в Simulink, соответствуют исходным данным пилотного проекта. Моделируется работа традиционных э/м трансформаторов тока и ЦИТ (см. рис.4-5).

На рис.4 показана форма тока СТ при КЗ в обмотке ВН. Электромагнитный ТТ под воздействием апериодической составляющей тока КЗ насыщается. Цифровые ТТ обеспечивают точную трансформацию первичного тока без искажений, вызванных эффектом насыщения.

На рис.5 показана относительная величина второй гармоники тока СТ при КЗ в обмотке ВН. Для ЦИТ эта величина в первые 10-20 мс процесса определяется только характеристиками используемого цифрового фильтра, и по окончании переходного процесса снижается практически до нуля. Для э/м ТТ из-за насыщения его сердечника величина второй гармоники существенно выше задаваемой уставки (как правило, 10-15 %), что в определенных условиях может стать причиной некорректной блокировки ДЗТ, особенно при большой остаточной намагниченности ТТ. В данном случае ЦИТ исключает эффект насыщения и обеспечивает высокое быстродействие защиты.

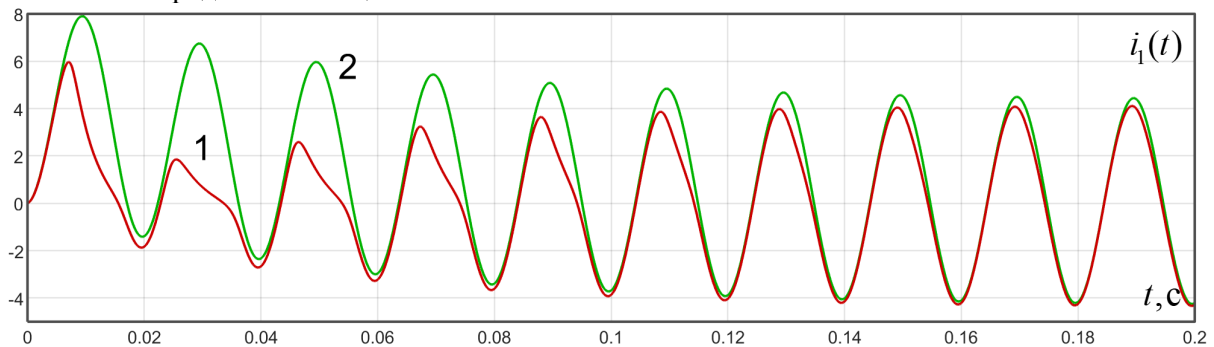


Рис. 4: Ток СТ при КЗ в обмотке ВН: 1 – э/м ТТ, 2 - ЦИТ

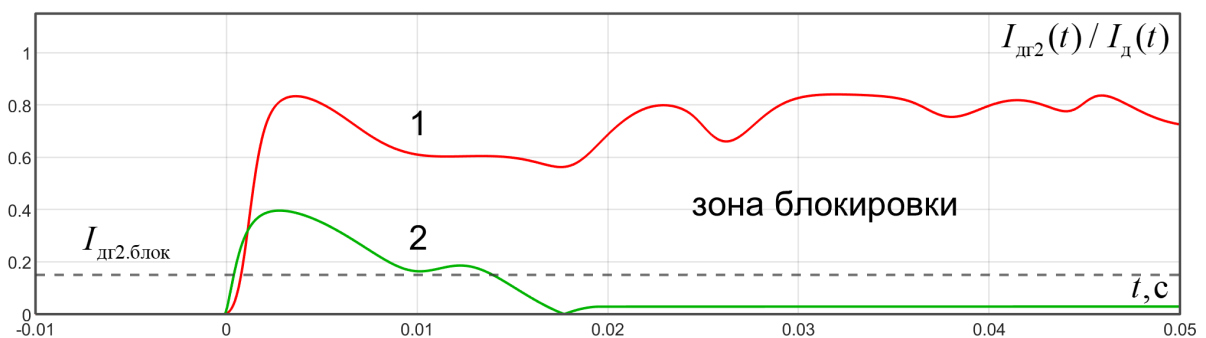


Рис. 5: Относительная величина второй гармоники тока СТ при КЗ в обмотке ВН: 1 – э/м ТТ, 2 - ЦИТ



Следует отметить, что применение разработанных ЦИТ не только обеспечивает более широкий диапазон точных измерений без дополнительных негативных эффектов, но также создает новые и более качественные условия для конфигурирования и обслуживания как самих ЦИТ, так и подключаемых к ним устройств РЗА и ИЭУ.

В ЦИТ реализовано измерение и формирование потоков синхровекторов токов и напряжений. Это позволяет уменьшить требования к промышленным локальным сетям Ethernet, к вычислительной мощности микроконтроллеров устройств РЗА и упрощает реализацию распределенных и централизованных систем релейной защиты и автоматики.

С точки зрения развития теории синхронизированных векторных измерений при использовании возникает задача с синтезом цифрового КИХ-фильтра для измерения синхровектора тока. Особенность синтеза фильтра в случае использования катушки Роговского связана с тем, выходной сигнал близок к производной контролируемого тока. Эффективное решение без потерь в быстродействии и точности измерений синхровектора тока при выполнении одного условия связано с использованием частотного преобразования для применяемых во многих устройствах РЗА частотного фильтра [11]. Указанный переход приводит к фильтру с комплексной импульсной функцией. При этом АЧХ такого фильтра в общем случае ассиметрична относительно нулевой частоты. Другой, предлагаемый авторами подход, связан с синтезом усредняющих фильтров с комплексной импульсной функцией [11].

ТРЕБОВАНИЯ К ЦИТ И СПОСОБЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Существенную часть проекта занимает вопрос синхронизации часов цифровых измерительных трансформаторов. Принимая во внимание, что речь идет об объекте с уровнем напряжения 110 кВ, мы находим оправданным использование в проекте оборудования (сервер времени, коммутаторы) с поддержкой синхронизации по локальной сети Ethernet по протоколу РТР (IEEE Std 1588-2008). Примененные ЦИТ так же имеют возможность синхронизации по РТР. В случае необходимости оптимизации экономических показателей, возможен переход от глобальной синхронизации по РТР на синхронизацию по IRIG/PPS с использованием в качестве источников не только блоков коррекции времени, но и самих цифровых трансформаторов [12].

Еще одной особенностью комбинированный цифровых трансформаторов тока и напряжения является передача т.н. однофазных измерений – один ток и одно напряжение в одном потоке. Анализ доступных в РФ на лето 2024 г. устройств РЗА с поддержкой IEC 61850-9-2 показал, что ни одно из предлагаемых устройств не может реализовать схему подписки на 7 (семь) SV-потоков для реализации дифференциальной защиты трансформатора 110/10/10 кВ. В связи с чем, нам, как разработчикам и производителям ЦИТ, пришлось реализовать схему объединения «однофазных» потоков в один «трехфазный» с набором данных, состоящим из 4-х токов и 4-х напряжений, как в [9] (см. рис. 4). Из-за сжатых сроков не было возможности ждать доработки производителями РЗА своих устройств, поэтому пришлось выбрать максимально доступное по срокам решение. Минусом такого подхода оказалось отсутствие поддержки [10]. Такая вероятность была предусмотрена нами при создании ЦИТ – публикацию SV можно настроить как с частотами 4000 Гц и 12800 Гц в соответствии с [9], так и 4800 Гц и 14400 Гц в соответствии с [10]. Может возникнуть вопрос, почему бы все три «однофазных» ЦИТ не сводить в одно общее объединяющее устройство. Бесспорно такой подход даёт большую экономию по материалам, но значительно сокращается универсальность принятого решения и практически исключается возможность взаимодействия с оборудованием сторонних производителей.

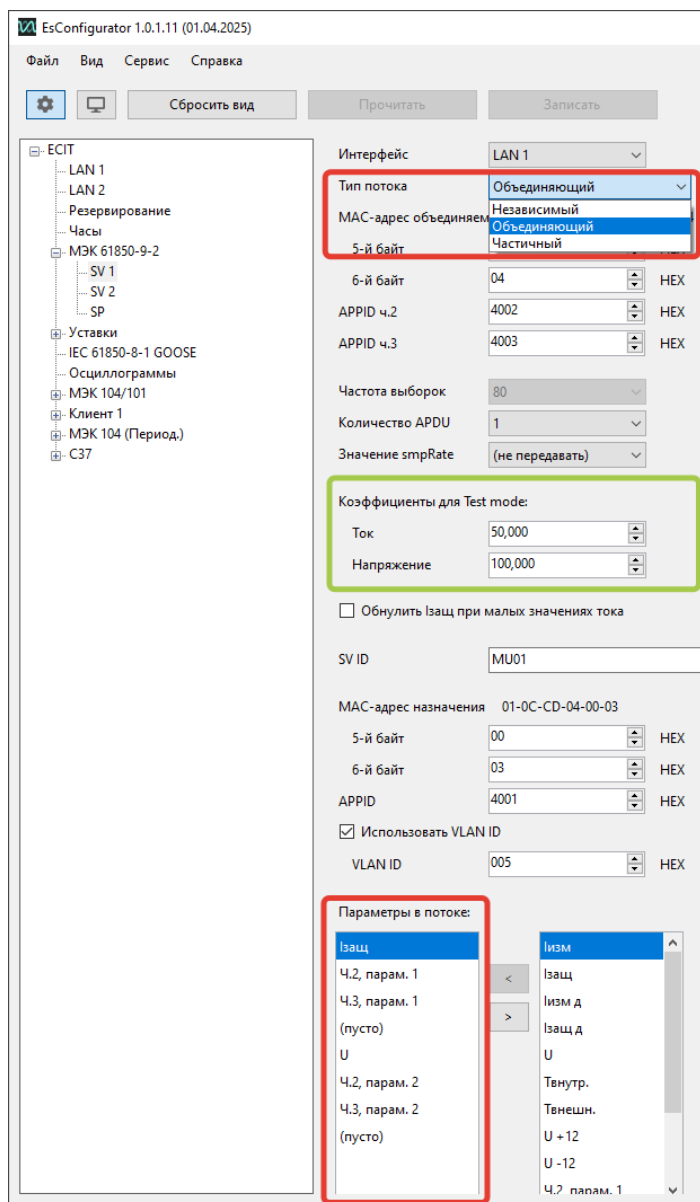


Рис. 4: Настройка «трехфазного» SV потока в соответствии с 9-2LE в ЦИТ ЕСИТ (красная обводка), настройка коэффициентов для тестового режима (зеленая обводка)

Табл. 1: Перечень SV, публикуемых ЦИТ для РЗА (ДЗТ, МТЗ) и СМСТ

№ порта коммутатора	Настройк и порта	Устройство на порту	SV	svID	dest. MAC (hex)	APPID (hex)	VLAN Id (dec)	Назначение
Оптика	VLAN							
1	U, 5, 7	ЕСИТ #1-1	SV80	MU01	01:0C:CD:04:00:03	4001	5	РЗА НН1
			SV240	MU01_1	01:0C:CD:04:00:07	4000	7	СМСТ НН1_1
2	U, 5, 8	ЕСИТ #1-2	SV80	MU01	01:0C:CD:04:00:04	4002	5	
			SV240	MU01_2	01:0C:CD:04:00:08	4000	8	СМСТ НН_2
3	U, 5, 9	ЕСИТ #1-3	SV80	MU01	01:0C:CD:04:00:04	4003	5	
			SV240	MU01_3	01:0C:CD:04:00:09	4000	9	СМСТ НН_3
4	U, 6, 10	ЕСИТ #2-1	SV80	MU02	01:0C:CD:04:00:05	4011	6	РЗА НН2
			SV240	MU02_1	01:0C:CD:04:00:0A	4000	10	СМСТ НН2_1
5	U, 6, 11	ЕСИТ #2-2	SV80	MU02	01:0C:CD:04:00:06	4012	6	
			SV240	MU02_2	01:0C:CD:04:00:0B	4000	11	СМСТ НН2_2
6	U, 6, 12	ЕСИТ #2-3	SV80	MU02	01:0C:CD:04:00:06	4013	6	
			SV240	MU02_3	01:0C:CD:04:00:0C	4000	12	СМСТ НН2_3
7	U, 3, 4	ЗОБ	SV80	T06224SV80	01:0C:CD:04:00:01	4000	3	РЗА ВН
			SV256	T06224SV256	01:0C:CD:04:00:02	4000	4	СМСТ ВН
8	-	-	-	-	-	-	-	-



ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ

В части диагностики и проверки защит для реализуемой работы был предложен следующий вариант (см. рис. 5). Вся схема соединений информационных связей между цифровыми трансформаторами с высокой и низкой сторон, терминалом РЗА с шиной процесса и шиной станции выполнена в неизменном проектном виде. Настройки ДЗТ для ДЗТ1(ДТО), ДЗТ2, ДЗТ3 взяты из проектного расчета и остаются неизменными на протяжении всех испытаний. Это основное преимущество подобного подхода, второе – это использование испытательных установок для проверки реле – наподобие Ретом-51/61/71. Испытательные установки должны быть синхронизированы друг относительно друга. Для того, чтобы трансформаторы смогли выдать номинальные и аварийные значения токов и напряжений, решено было реализовать тестовый режим с возможностью установки дополнительных множителей (см. рис. 4), с тем, чтобы условные 15 А, 100 В от испытательных установок можно было преобразовать в фактические значения аварийных токов и напряжений для испытуемого присоединения. Естественно, трансформатор вручную переводится в тестовый режим, чтобы иметь возможность фиксировать работу защит от тестовых потоков. Трансформаторы переводятся в тестовый режим через заводское ПО, а выводятся путем перезагрузки. Так же наличие активного тестового режима, кроме специальных флагов в SV-потоках, дублируется световой сигнализацией на корпусе электронных блоков ЦИТ.

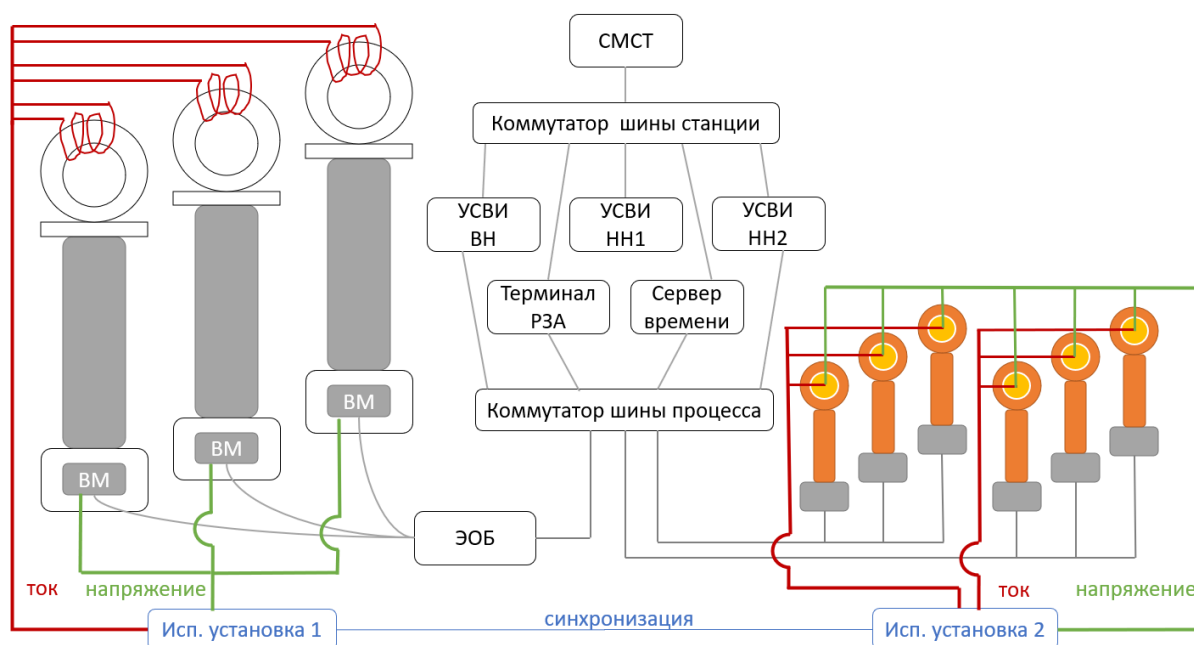


Рис. 5: Схема испытательного стенда с ЦИТ 110 кВ и 10 кВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированный пример использования цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения для защиты и мониторинга силового трансформатора показывает наличие у ЦИТ серьезных преимуществ в сравнении с электромагнитными ТТ и ТН. Потенциал ЦИТ может быть раскрыт только при совместной работе производителей цифровых трансформаторов и устройств РЗА. Уменьшение стоимости комплексов РЗА с использованием ЦИТ возможно только при условии использования новых алгоритмов РЗА и обоснованных новых коэффициентов, используемых для расчета параметров срабатывания защит.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Комбинированный измерительный трансформатор ЕСИТ-1. Описание типа. Регистрационный номер в ФИФ 94207-24.



- [2] Трансформаторы тока и напряжения комбинированные. Описание типа. Регистрационный номер в ФИФ 72862-18.
- [3] Мокеев А.В., Пискунов С.А. Дистанционная защита на основе одностороннего и двухстороннего измерения синхровекторов. Релейная защита и автоматизация, 2024, № 1 (54). С. 8-15.
- [4] ГОСТ Р 58669-2019 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях»
- [5] Приказ Минэнерго от 10 июля 2020 г. N 546 «Об утверждении требований к релейной защите и автоматике различных видов и ее функционированию в составе энергосистемы и о внесении изменений в приказы минэнерго россии от 8 февраля 2019 Г. N 80, ОТ 13 февраля 2019 Г. N 100, ОТ 13 февраля 2019 Г. N 101
- [6] п. 2.2.2, Концепция развития релейной защиты, автоматики и автоматизированных систем управления технологическими процессами электросетевого комплекса группы компаний «Россети», 2022.
- [7] Рекомендации по применению и выбору уставок дифференциального модуля SPCD 3D53 реле SPAD 346C. SPAD 346C. Дифференциальное реле с торможением. Руководство пользователя и техническое описание.-АББ Реле – Чебоксары, 1999.
- [8] п.4.8.3, Многофункциональное измерительное устройство ESM. Руководство по эксплуатации. Ред.03.2025.
- [9] "Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC 61850-9-2", UCA International Users Group, 2004.
- [10] п. 10, СТО 56947007-25.040.30.309-2020 "Корпоративный профиль МЭК 61850", ПАО "ФСК ЕЭС" 2020 г. с изм. от 24.03.2023.
- [11] Ульянов Д.Н., Мокеев А.В., Плакидин Р.С., Пискунов С.А. Преимущества применения комбинированных цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения с поддержкой СВИ в системах защиты, автоматики, мониторинга и управления // Сб. докладов междунар. научно-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2025», 1–3 октября 2025 (в процессе публикации).
- [12] Ульянов Д.Н., Сеитов П.В., Мокеев А. В. Опыт применения синхровекторных измерений для реализации релейной защиты и автоматики в распределительных электрических сетях 10 кВ // Релейщик. - 2025. - №. 1. - С. 46-52.