



ens

инженерный центр
энергосервис

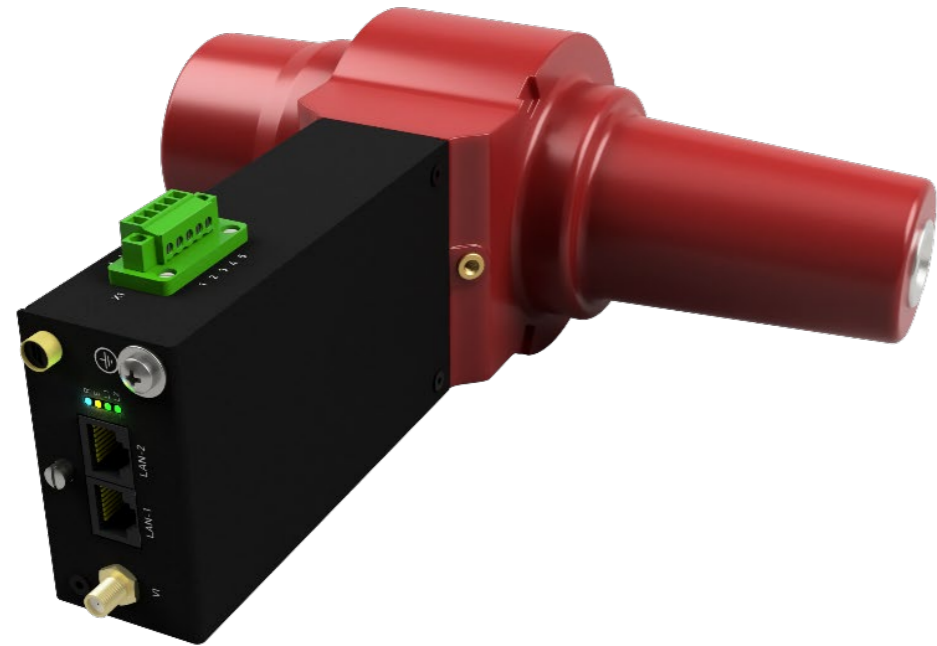
12-я Научно-техническая конференция «Энергия Белых Ночей»

**Комбинированные измерительные трансформаторы
с цифровым выходом в сетях 6–35 кВ:
метрологические задачи и способы их решения**

Р.С. Плакидин, Д.Н. Ульянов, А.В. Мокеев

Санкт-Петербург
27.05.2026

Классификация объекта по IEC 61869



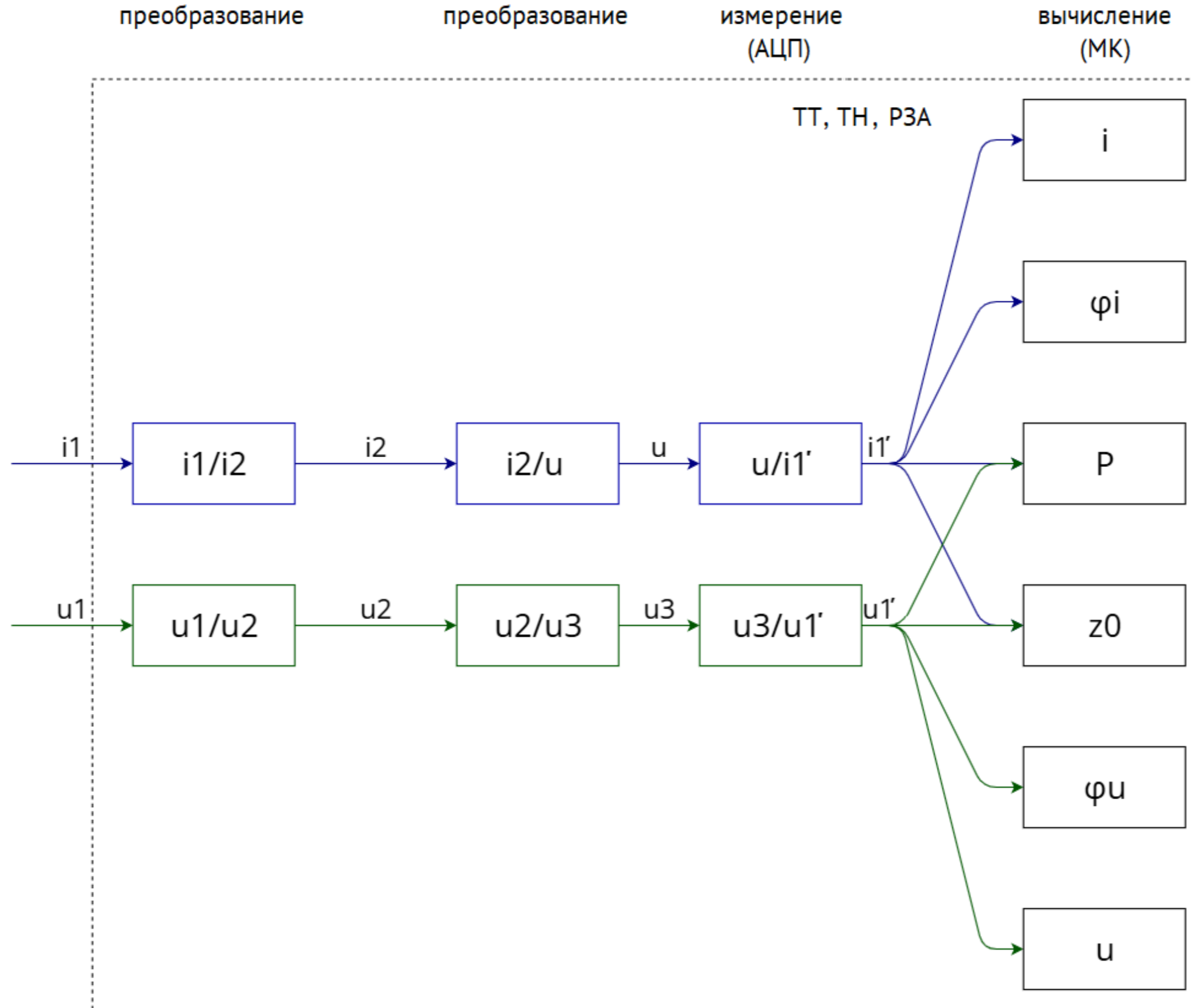
измерительный трансформатор



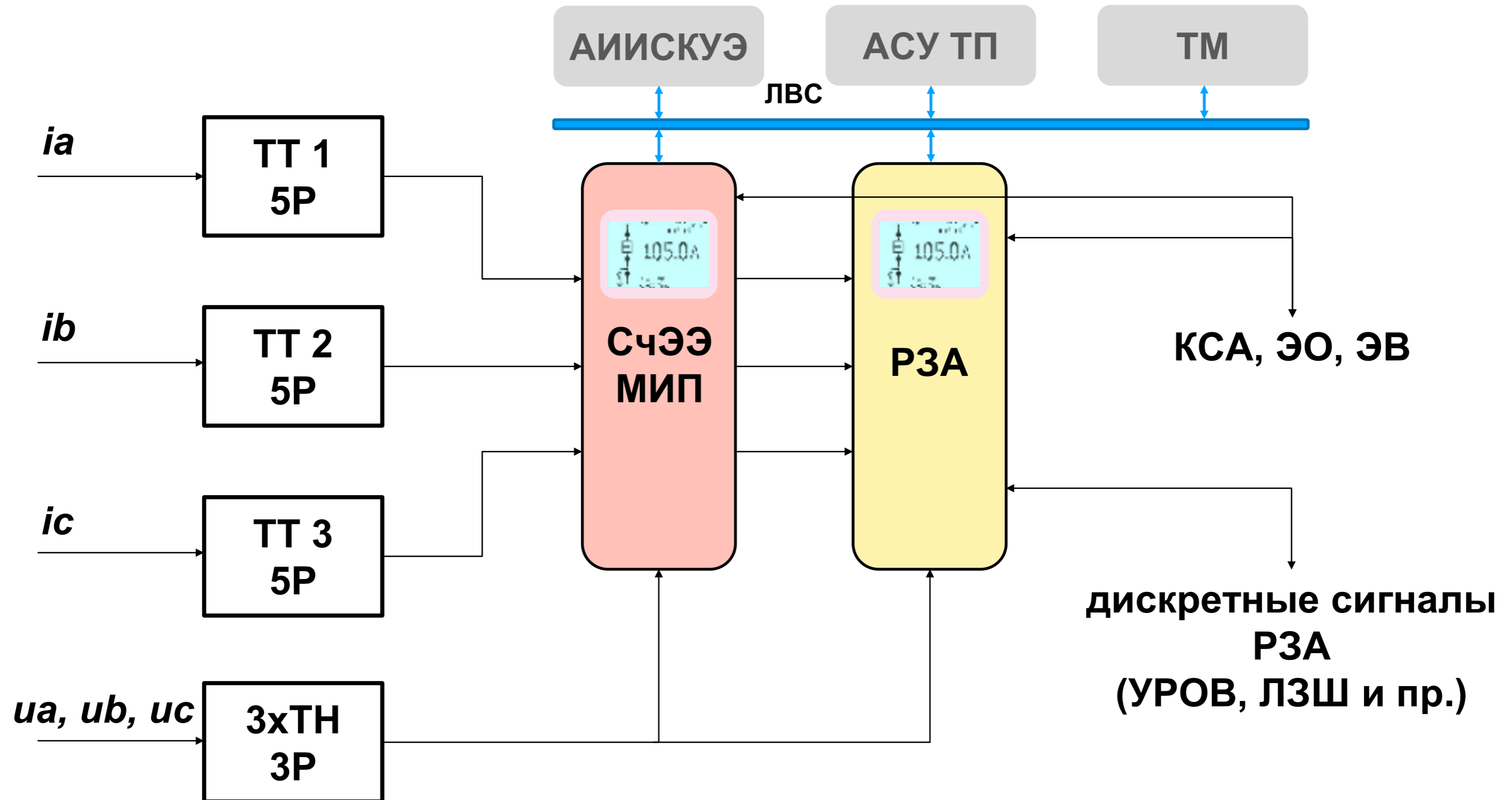
IEC 61869-1



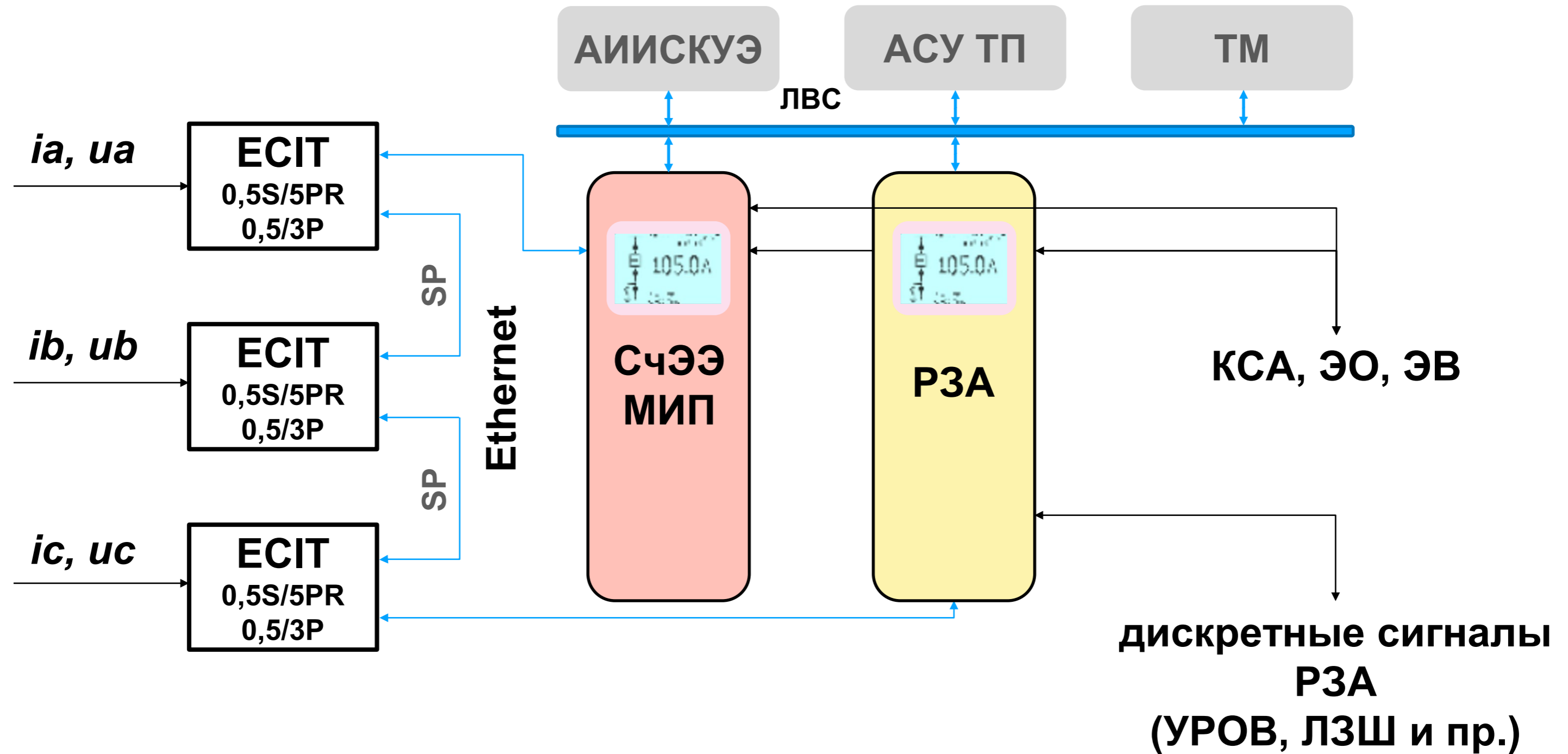
Перераспределение функций



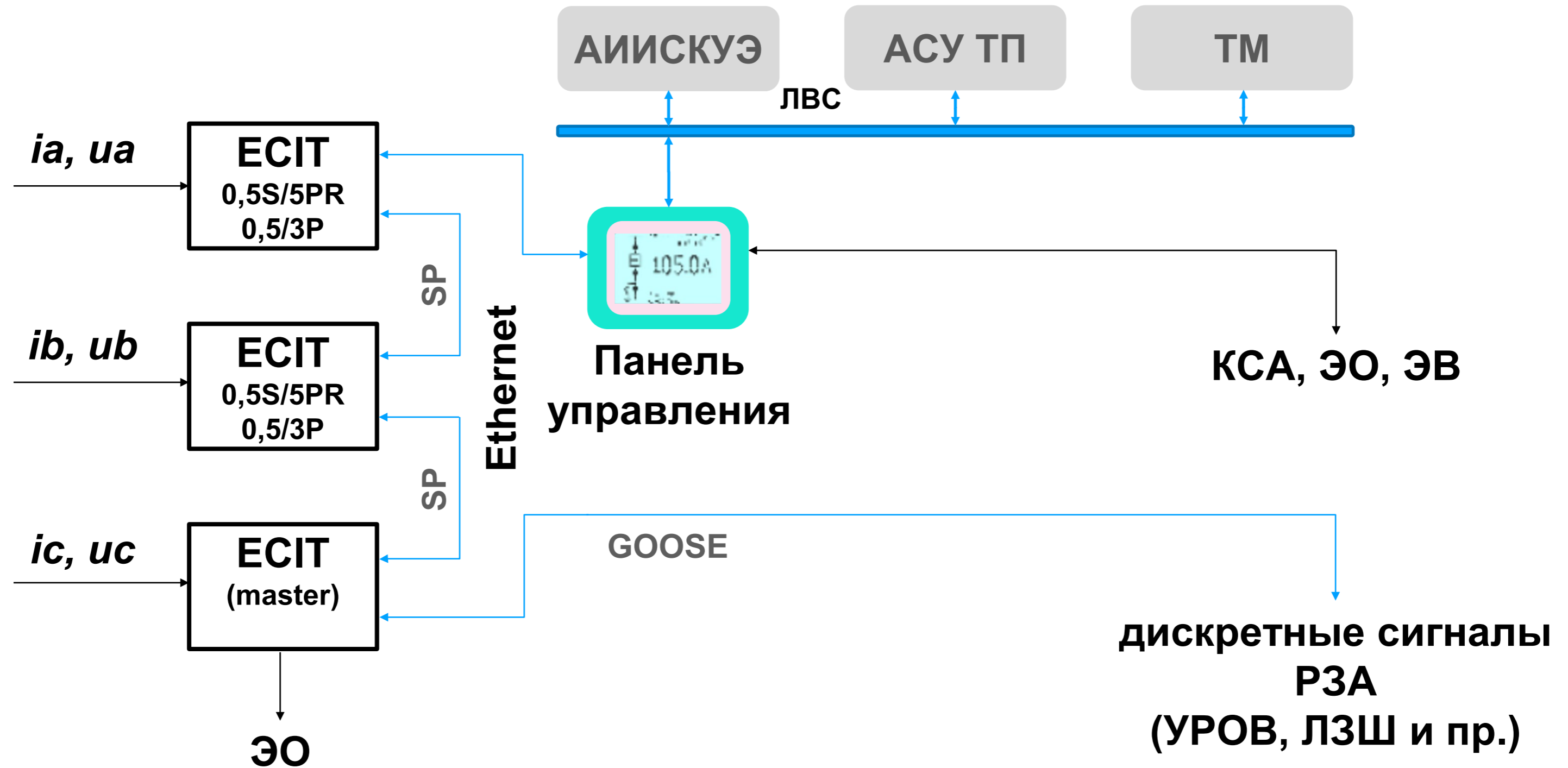
Система АСУ ячейки 6-10 кВ



Система АСУ ячейки 6-10 кВ



Система АСУ ячейки 6-10 кВ



WEB-интерфейс

ЕСИТ_М
№ 410

Монитор: Трехфазный

EN

Устройство

Конфигурация

Настройки РЗА

Диагностика

Журнал системы

Монитор

Однофазный

Трехфазный

Дискреты

Архивы

Журнал событий

Измерения

Срезы энергий

Профиль нагрузки

Осциллограммы

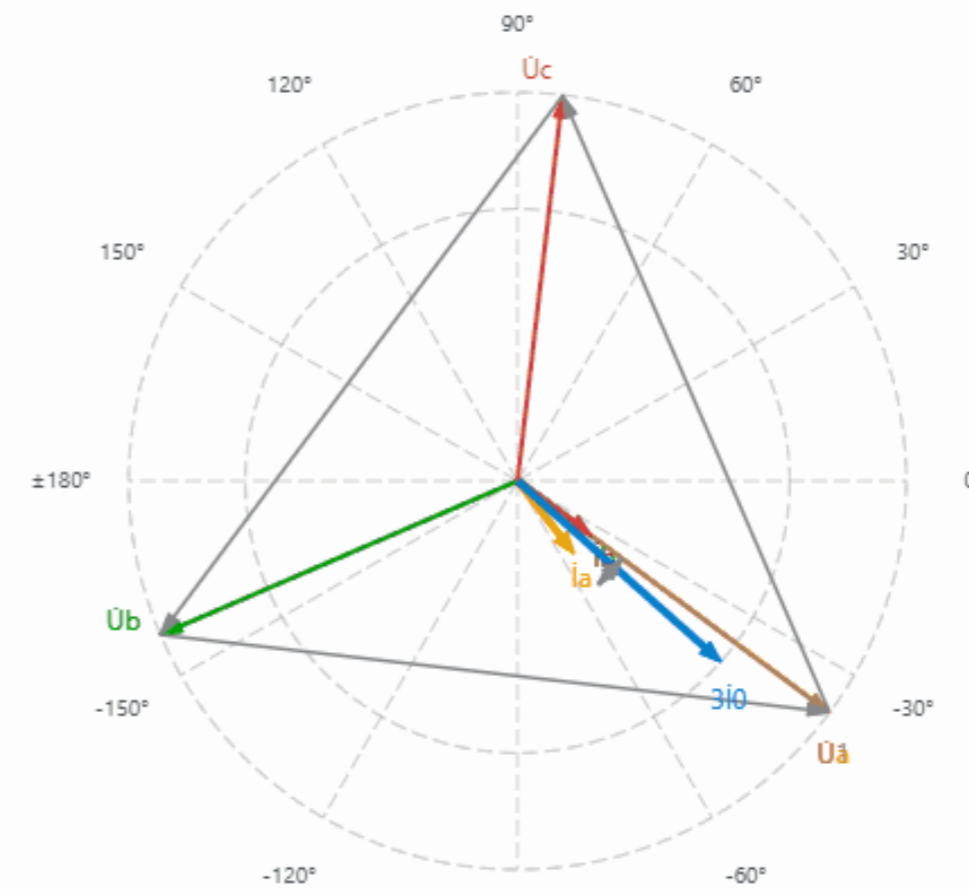
Обновлено 21.05.2026, 17:55:23

Автообновление: [Вкл.](#)

Синхровекторы

21.05.2026, 14:55:32.285 (UTC) синхр. (local)

<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{U}_a, В$	100.119	$\sphericalangle 233.441^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{U}_b, В$	100.227	$\sphericalangle 113.322^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{U}_c, В$	99.952	$\sphericalangle 353.338^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_a, А$	10.1391	$\sphericalangle 217.957^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_b, А$	10.0604	$\sphericalangle 233.417^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_c, А$	10.0357	$\sphericalangle 233.367^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{U}_{ab}, В$	173.582	$\sphericalangle 263.382^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{U}_{bc}, В$	173.346	$\sphericalangle 143.284^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{U}_{ca}, В$	173.207	$\sphericalangle 23.401^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_{ab}, В$	2.641	$\sphericalangle 136.702^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_{bc}, В$	0.026	$\sphericalangle 253.014^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_{ca}, В$	2.630	$\sphericalangle 317.212^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{U}_1, В$	100.100	$\sphericalangle 233.356^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{U}_2, В$	0.127	$\sphericalangle 314.813^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $3\dot{U}_0, В$	0.101	$\sphericalangle 148.157^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_1, А$	0.8717	$\sphericalangle 136.739^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_2, А$	0.8853	$\sphericalangle 137.171^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $3\dot{I}_0, А$	29.9634	$\sphericalangle 228.377^\circ$



WEB-интерфейс

ЕСИТ_М
№ 410

Монитор: Однофазный

EN

Устройство

Конфигурация

Настройки РЗА

Диагностика

Журнал системы

Монитор

Однофазный

Трёхфазный

Дискреты

Архивы

Журнал событий

Измерения

Срезы энергий

Профиль нагрузки

Осциллограммы

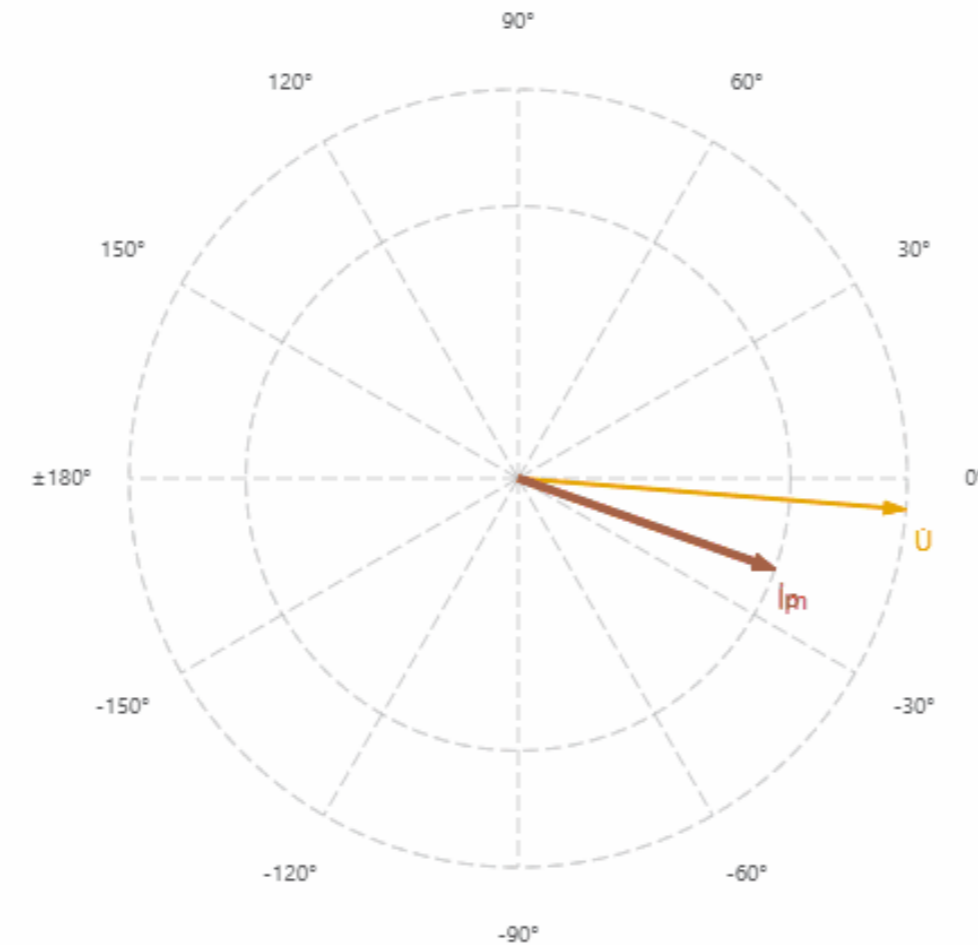
Обновлено 21.05.2026, 17:57:01

Автообновление: [Вкл.](#)

Синхровекторы

21.05.2026, 14:57:10.507 (UTC) синхр. (local)

<input checked="" type="checkbox"/> \dot{U} , В	100.251	$\angle 265.438^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{I}_m , А	10.0953	$\angle 250.504^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{I}_p , А	10.0702	$\angle 250.606^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> \dot{I}_{2har} , А	0.2115	$\angle 240.402^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/> $\dot{I}_{3/5/7har}$, А	0.0951	$\angle 30.092^\circ$



Средние квадратические

21.05.2026, 14:57:10.512 (UTC) синхр. (local)

U, В	100.210
I_m , А	10.0957
I_p , А	10.1428
dI_p/dt , А/с	10.2970
P, Вт	977.508
Q, вар	260.581
S, В·А	1011.644
cos φ	0.9693
F, Гц	49.946
dF/dt , Гц/с	-0.049
Яркость, лк	36.00
THD	0.00

Энергия

21.05.2026, 14:57:10 (UTC)

WP+, Вт·ч	1738
WP-, Вт·ч	2
WQ+, вар·ч	54
WQ-, вар·ч	99

Температура

Накоплено 2209 измерений

Параметр	Текущ.	Макс.	Средн.	Мин.
Т внеш, °С	25.10	28.41	26.30	24.35
Т внутр, °С	44.46	48.90	46.61	44.18

WEB-интерфейс

ЕСИТ [Инфо](#) [Измерения](#) [Диагностика](#) [Архив ТС](#) [Архив UI](#) [Осциллограммы](#) [Журнал](#)

Передача данных

	Принято (RX)	Отправлено (TX)
LAN 1	3.2231 ГБ	2.7464 ГБ
LAN 2	1.0795 ГБ	366.4231 МБ
UART (служебный)	0 Б	0 Б

Устройство

Время непрерывной работы (uptime)	251 сут, 18:57:23
U +12, В	12.004
U -12, В	-11.805

МЭК 61850-9-2

Поток	SV 1	SV 2	SP
Включен	Да	Да	Нет
Скачков последовательности smpCnt	1	1	0
Тестовый режим запущен	Нет	Нет	Нет

МЭК 61850-8-1 GOOSE

Публикация	Нет
Подписка	Нет

Синхронизация времени

Время на устройстве	19.05.2026, 09:53:14.855 (UTC)
Протокол синхронизации	PTP
Ход часов синхронизирован	Да, последняя синхронизация по PTP только что

WEB-интерфейс

Прочитано 19.05.2026, 12:53:55

[Обновить](#)

Суточные

Температура

Накоплено 222553 измерений

Параметр	Текущ.
Т внеш, °С	24.09
Т внутр, °С	49.07

Напряжение (U)				Ток (Ip)			
Дата периода (UTC)	Макс.	Средн.	MSD	Дата периода (UTC)	Макс.	Средн.	MSD
18.05.2026, 00:00:00	6048.447	5926.585	46.648	18.05.2026, 00:00:00	315.842	231.321	34.977
17.05.2026, 00:00:00	7181.146	5983.115	61.806	17.05.2026, 00:00:00	291.832	237.106	35.030
16.05.2026, 00:00:00	7577.665	5964.678	120.416	16.05.2026, 00:00:00	304.516	238.003	40.054
15.05.2026, 00:00:00	7843.686	6036.123	349.125	15.05.2026, 00:00:00	303.616	236.325	39.555
14.05.2026, 00:00:00	5959.037	5878.854	35.327	14.05.2026, 00:00:00	300.073	240.209	36.531
13.05.2026, 00:00:00	6030.476	5934.955	39.547	13.05.2026, 00:00:00	295.659	240.035	37.419
12.05.2026, 00:00:00	6061.622	5910.923	45.078	12.05.2026, 00:00:00	308.943	241.314	36.753
11.05.2026, 00:00:00	6206.104	5903.342	38.626	11.05.2026, 00:00:00	295.194	236.522	35.363
10.05.2026, 00:00:00	6090.177	5919.259	27.055	10.05.2026, 00:00:00	281.072	232.755	31.510
09.05.2026, 00:00:00	6114.687	5914.069	31.113	09.05.2026, 00:00:00	284.427	234.499	29.523
08.05.2026, 00:00:00	6021.125	5945.646	37.842	08.05.2026, 00:00:00	308.534	243.066	32.952
07.05.2026, 00:00:00	6075.394	5872.545	71.106	07.05.2026, 00:00:00	291.730	241.426	34.700
06.05.2026, 00:00:00	6504.617	5894.790	48.621	06.05.2026, 00:00:00	297.116	244.169	34.646
05.05.2026, 00:00:00	6443.445	5889.306	45.211	05.05.2026, 00:00:00	309.916	251.583	37.154
04.05.2026, 00:00:00	6056.831	5921.500	33.705	04.05.2026, 00:00:00	303.035	246.018	34.256
03.05.2026, 00:00:00	6513.692	5886.567	54.553	03.05.2026, 00:00:00	374.964	240.366	33.614
02.05.2026, 00:00:00	5947.827	5882.993	28.566	02.05.2026, 00:00:00	290.004	240.357	33.230
01.05.2026, 00:00:00	5942.500	5862.273	33.941	01.05.2026, 00:00:00	294.739	240.657	31.952
30.04.2026, 00:00:00	6105.222	5895.673	50.319	30.04.2026, 00:00:00	295.603	227.427	37.552
29.04.2026, 00:00:00	6122.190	5905.947	36.277	29.04.2026, 00:00:00	311.685	241.938	47.443
28.04.2026, 00:00:00	6072.034	5913.124	37.363	28.04.2026, 00:00:00	312.510	255.196	38.594
27.04.2026, 00:00:00	6156.128	5908.391	33.941	27.04.2026, 00:00:00	306.812	251.027	36.616
26.04.2026, 00:00:00	5940.303	5854.289	39.950	26.04.2026, 00:00:00	300.048	242.017	32.286
25.04.2026, 00:00:00	6002.167	5910.322	36.824	25.04.2026, 00:00:00	300.173	246.978	35.822
24.04.2026, 00:00:00	6100.077	5900.684	40.348	24.04.2026, 00:00:00	301.333	246.577	33.140
23.04.2026, 00:00:00	5998.750	5899.735	34.986	23.04.2026, 00:00:00	310.327	255.146	32.789
22.04.2026, 00:00:00	5994.914	5891.588	33.705	22.04.2026, 00:00:00	320.554	267.069	33.839
21.04.2026, 00:00:00	5996.890	5904.803	31.937	21.04.2026, 00:00:00	318.989	265.319	34.399
20.04.2026, 00:00:00	5991.121	5888.382	31.623	20.04.2026, 00:00:00	331.365	267.828	37.258

Статистика напряжения (U)

Интервал	Начало периода (UTC)
Сек.	19.05.2026, 09:53:10
Мин.	19.05.2026, 09:52:00
Час	19.05.2026, 08:00:00
Сутки	18.05.2026, 00:00:00

Перечень РЗА в ЕСИТ

Идентифицировать Прочитать Записать Установить группу

Группа 1

- 01.МТЗ-1
- 02.МТЗ-2
- 03.ТО-1
- 04.ТО-2
- 05.ТЗНП-1
- 05.ТЗНП-2
- 06.ЗОП
- 07.ЗДЗ
- 08.БНТ
- 09.ЗМН-1
- 09.ЗМН-2
- 10.Внешнее откл.
- 11.ЛЗШ
- 12.УРОВ
- 13.КНГ
- 14.КОН
- 15.КНН
- 20.ЗПН
- 21.ОМП
- 22.оуМТЗ
- 23.оуТЗНП
- 24.ЗПП
- 25.ЗПЧ
- 26.АЧР-1
- 27.АЧР-2
- 28.ЧАПВ
- 29.ВАЧР
- 30.АПВ
- 31.Сигнализация
- 32.Упр. Выключателем

Группа 2
Группа 3
Группа 4
Группа 5
Группа 6
Группа 7
Группа 8

1.Максимальная токовая защита-1

МТЗ-1 ввод (B1.1)

Характеристика (B1.9) Независимая

I срабатывания, А 100,000

Тср. МТЗ-1, мс 100

TMS МТЗ-1 1,000

Орган направления мощности

Ввод ОНМ (B1.3)

Угол ϕ макс. чувст., ° 45

Угол ϕ сектора, ° 60

Вывод ОНМ при сбое СВИ (B1.4)

Пуск по напряжению

Ввод пуска по напряжению (B1.5)

U срабатывания, В 1000,000

Ввод пуска по U2 (B1.6)

U2 срабатывания, В 100,000

Вывод U при сбое СВИ (B1.7)

Ускорение

Ввод ускорения (B1.8)

Тср. Уск. МТЗ-1, мс 10

1. МТЗ-1

1.2 МТЗ Пуск

13.1 КНГ Сраб.

1с

B1.8

Тср. АУ МТЗ-1

МТЗ-1 Ускорение 1.3

Тср. МТЗ-1

МТЗ-1 Сраб. 1.1 12,17,18

TMS МТЗ-1

В1.1

В1.9

МТЗ-1 Пуск 1.2 11,17,18,21

ОНМ

Пуск по U

В1.3

В1.5

A

B

C

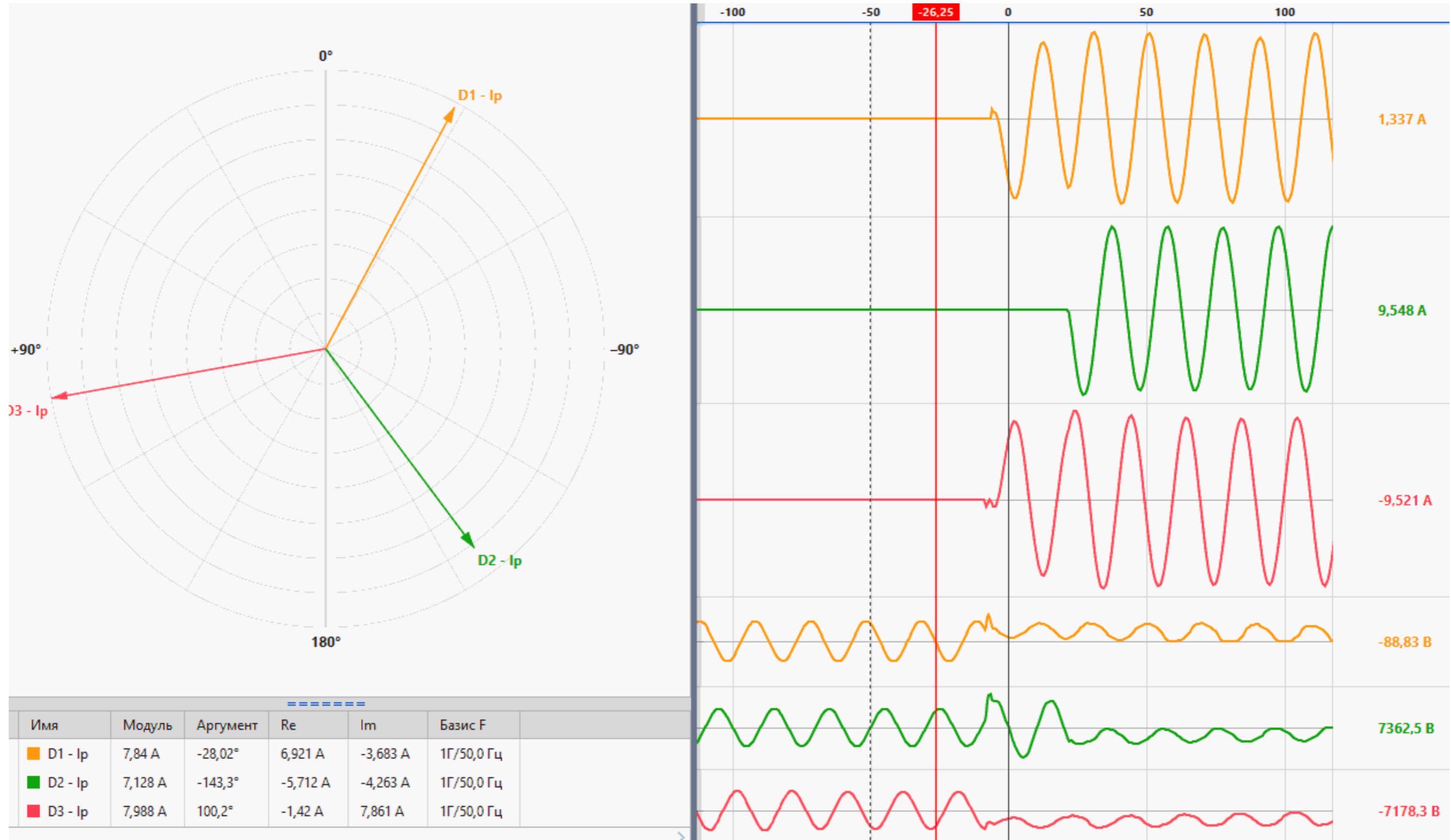
Ia

Ib

Ic

МТЗ, ТО, ТЗНП, ЗОП, ЗДЗ, БНТ, ЗМН, ЛЗШ, УРОВ, КНГ, КОН, КНН, ЗПН, ОМП, ЗПП, ЗПЧ, АЧР, ЦАПВ, ВАЧР, АПВ

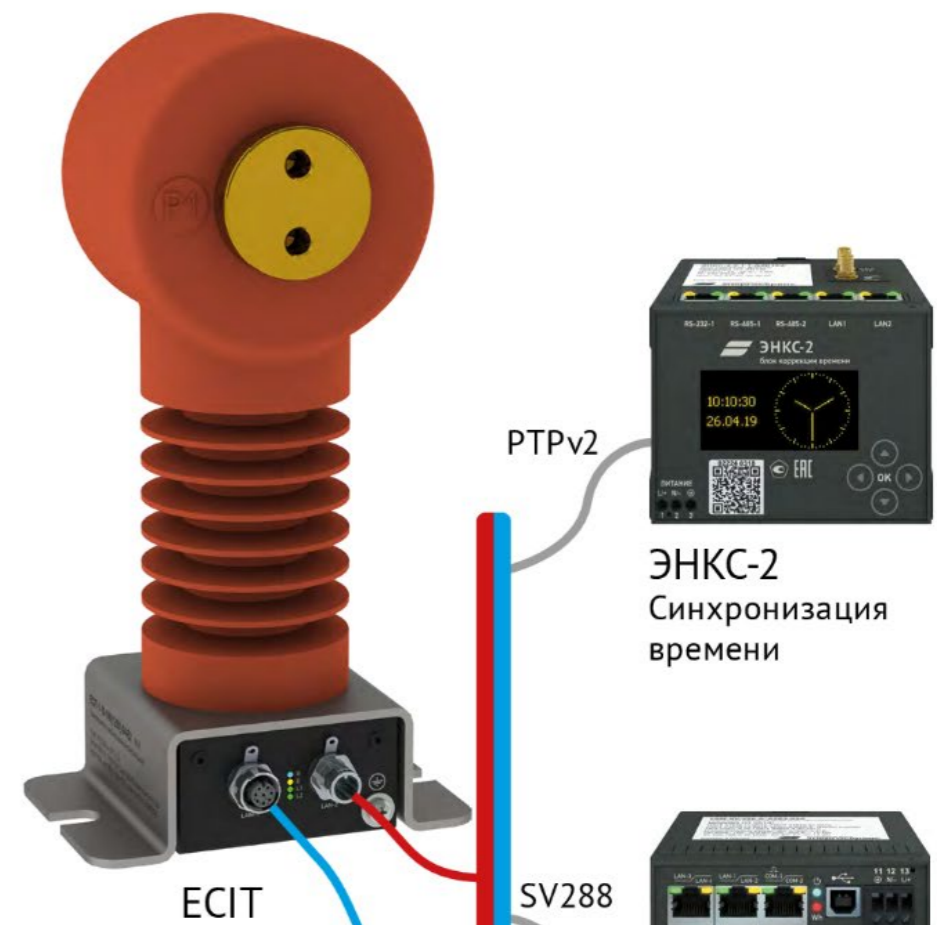
Регистратор аварийных событий



Комбинированный измерительный трансформатор ECIT



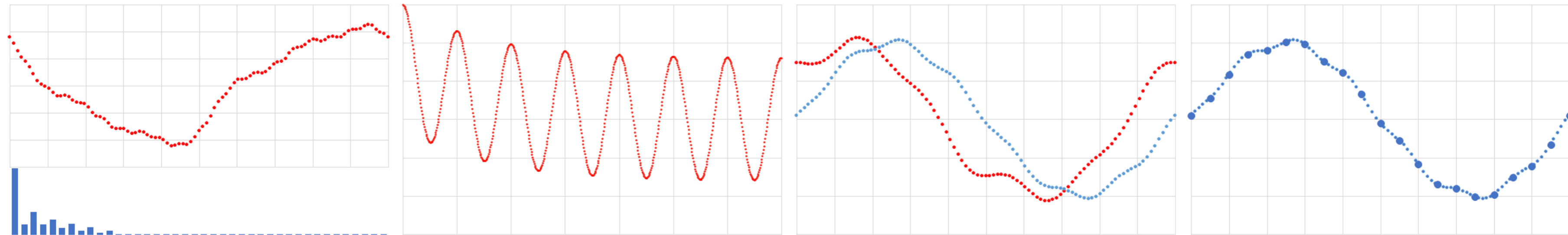
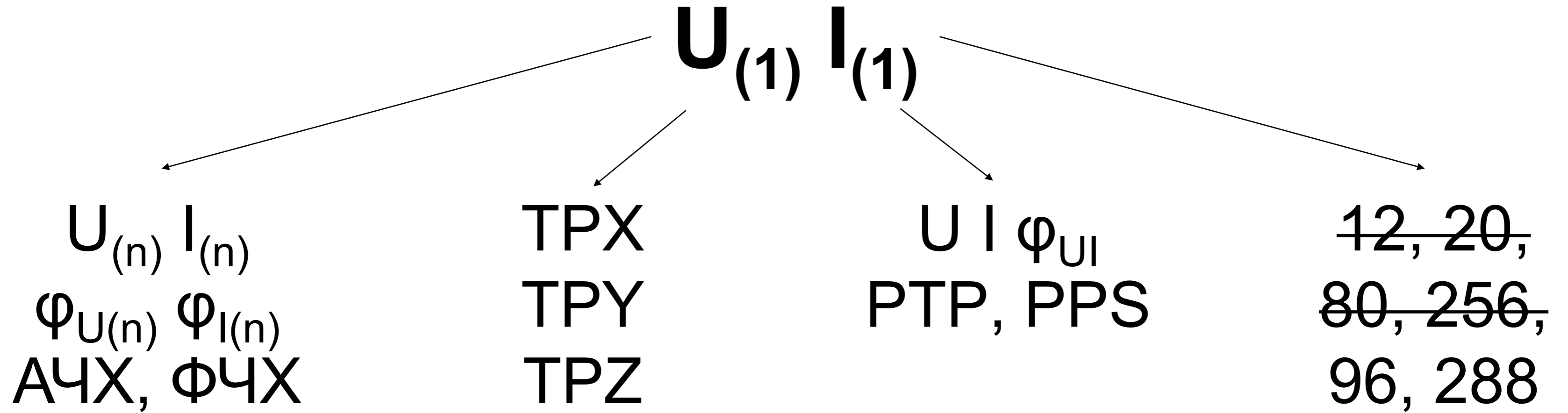
94207-24



Пределы допускаемой абсолютной погрешности угла фазового сдвига напряжения, '	± 20 при $0,8 \cdot U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,2 \cdot U_{\text{НОМ}}$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности угла фазового сдвига силы тока, '	± 45 при $0,01 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I < 0,05 \cdot I_{\text{НОМ}}$ ± 30 при $0,05 \cdot I_{\text{НОМ}} < I < 10 \cdot I_{\text{НОМ}}$
Пределы допускаемой абсолютной угловой погрешности фазового сдвига между фазным напряжением и током, '	± 20 при $0,01 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I < 0,05 \cdot I_{\text{НОМ}}$ ± 15 при $0,05 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I \leq 10 \cdot I_{\text{НОМ}}$



Измеряемые параметры



Генераторы тока и напряжения для первичных цепей



Схема подключения (напряжение)

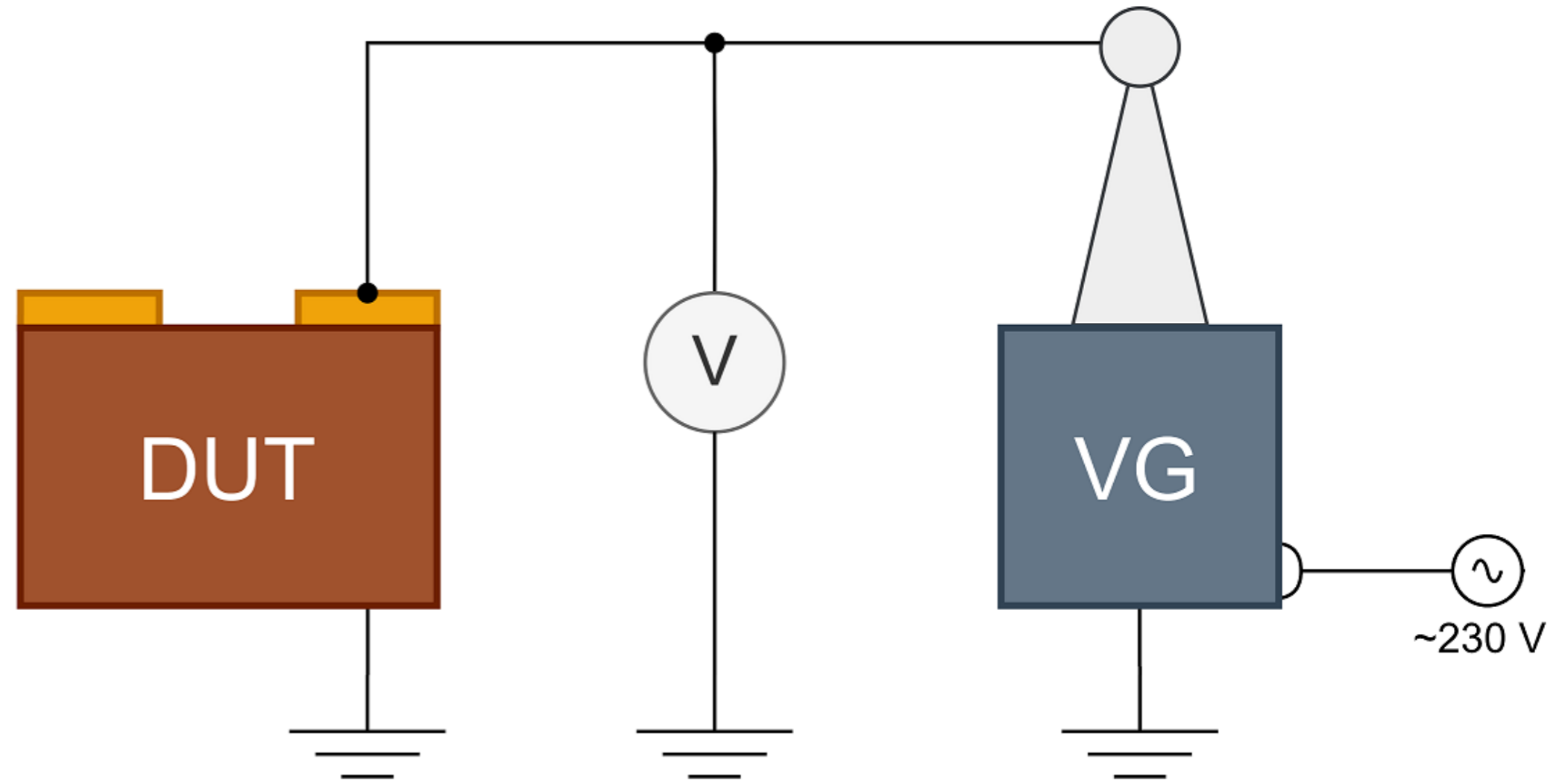


Схема подключения (сила тока)

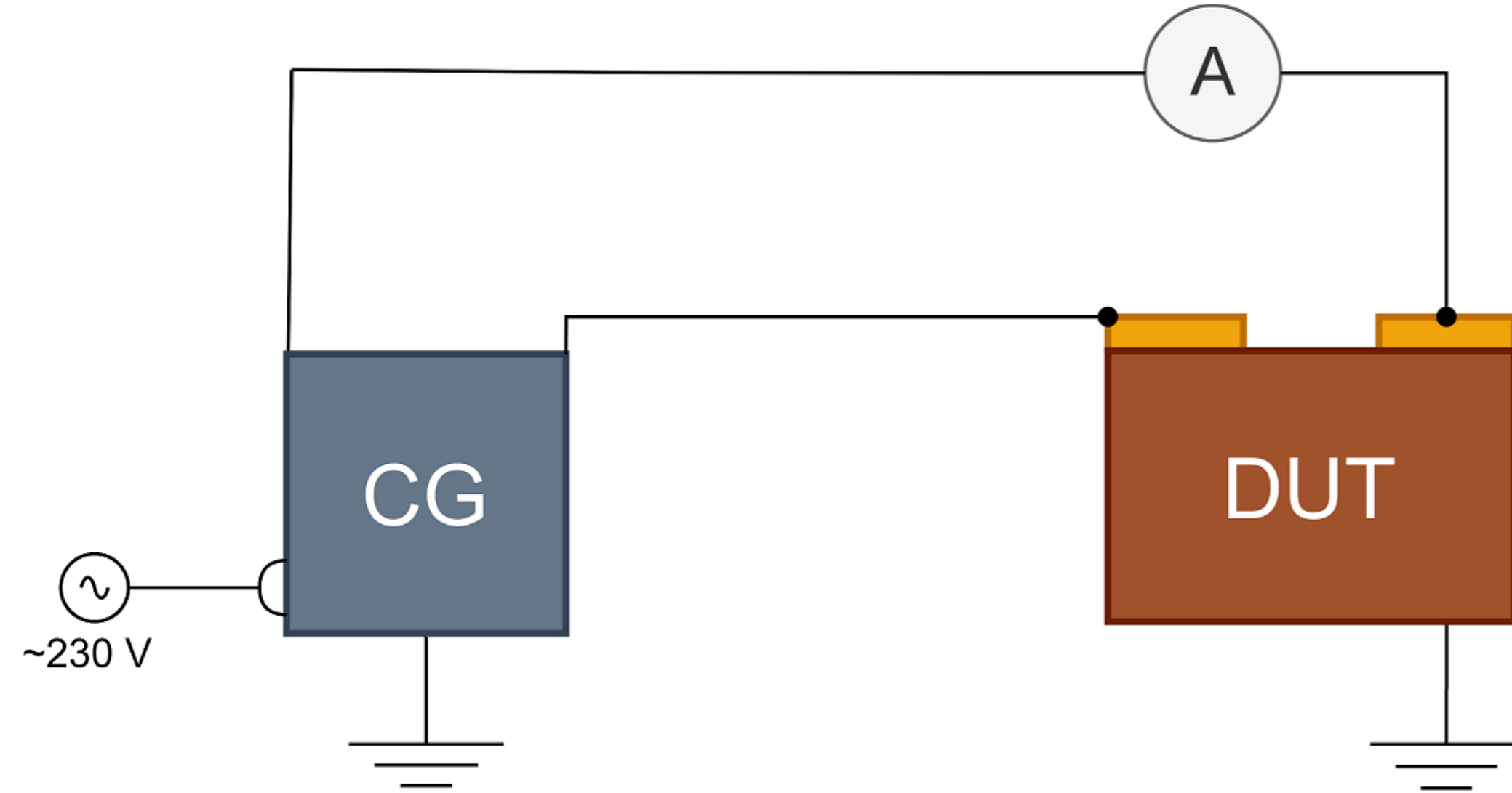
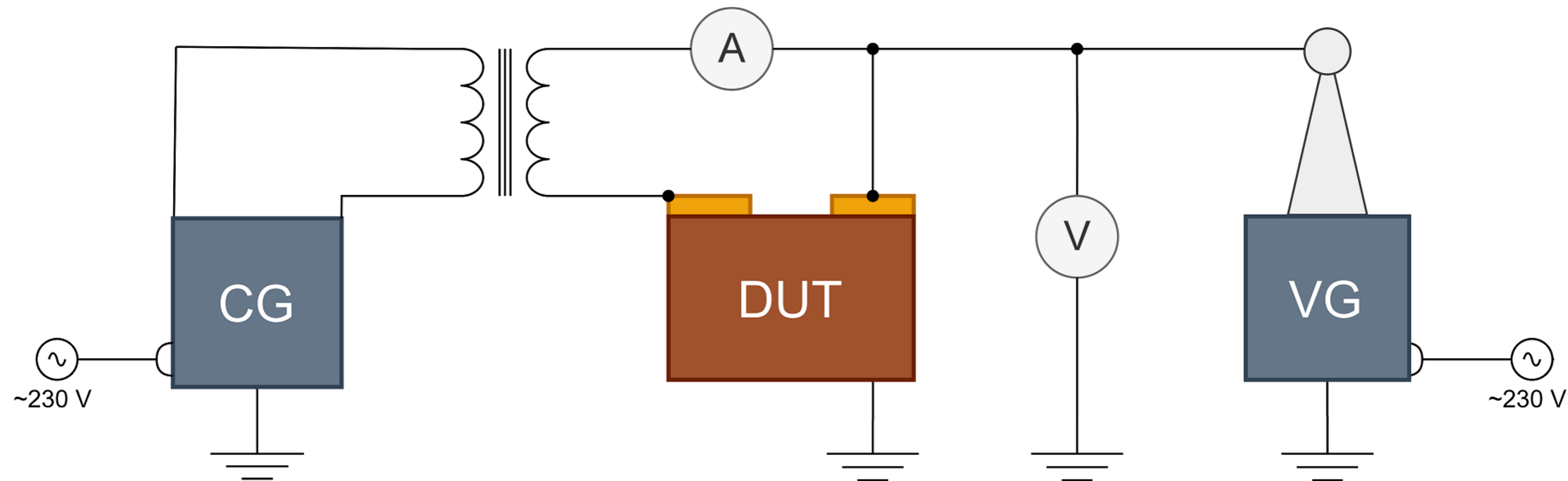
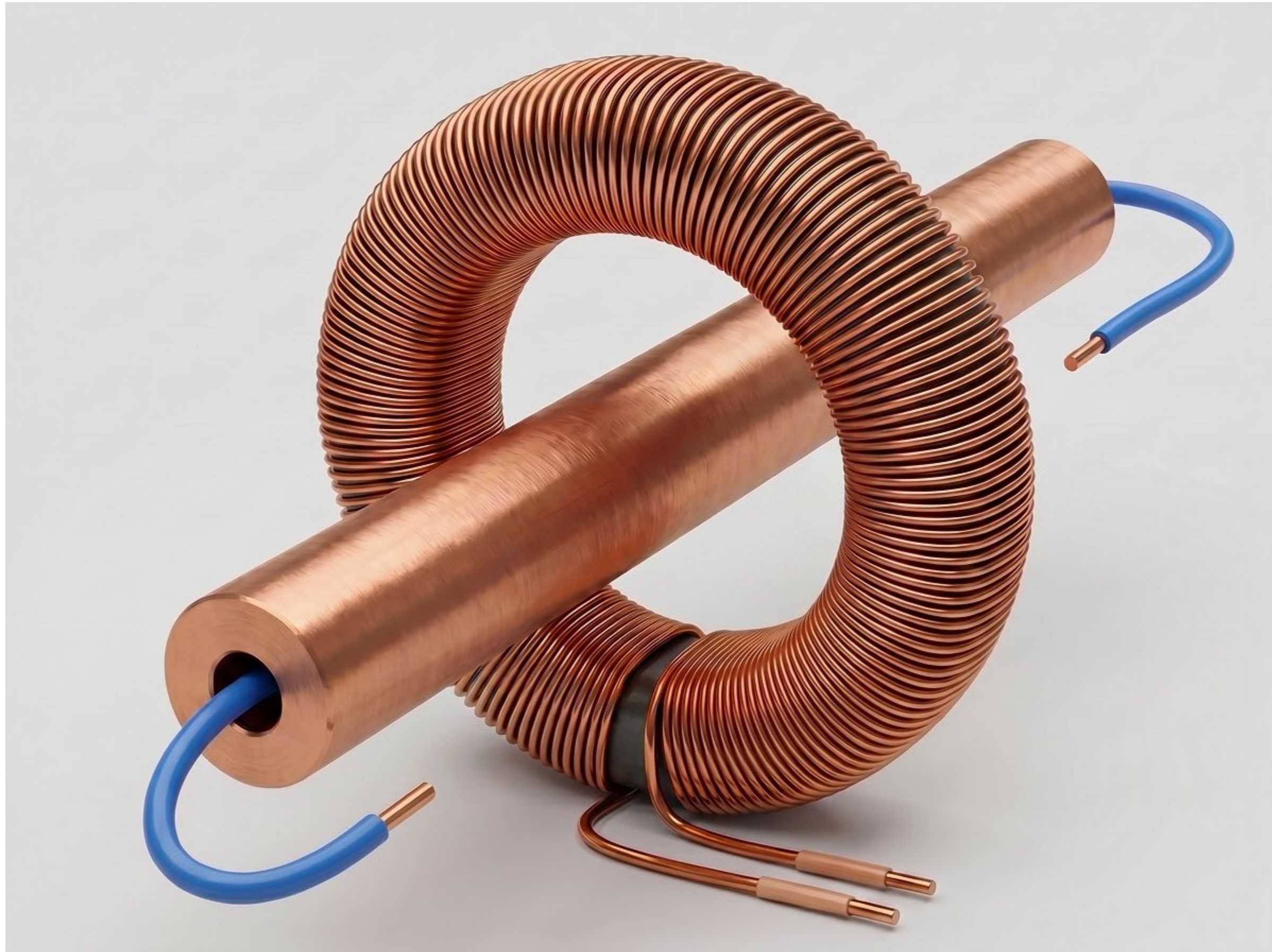


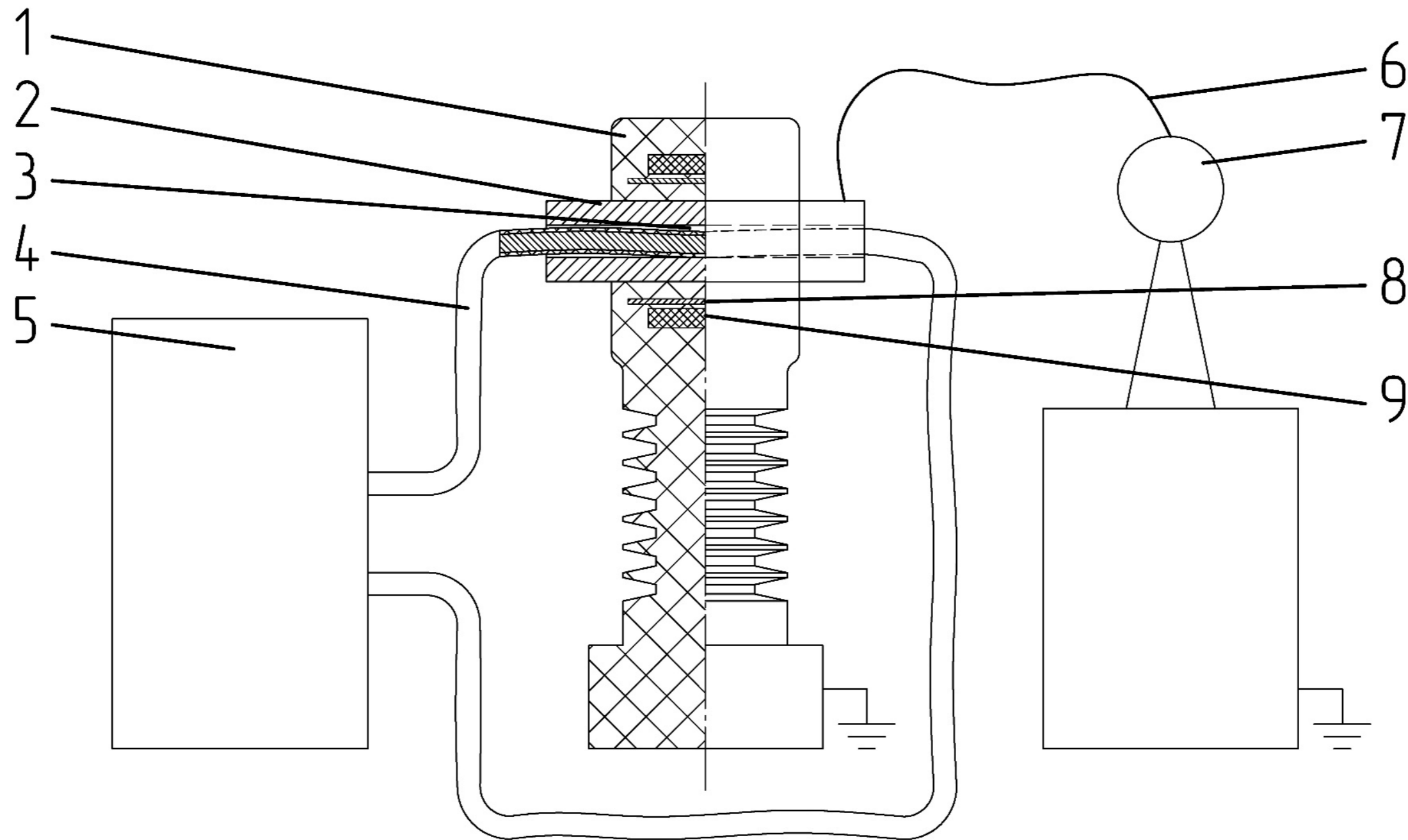
Схема подключения (ток + напряжение)



ECIT-1



Патент №2837035



- 1 – комбинированный измерительный трансформатор
- 2 – первичный токопровод трансформатора
- 3 – сквозное отверстие
- 4 – изолированный провод от генератора тока
- 5 – генератор тока

- 6 – провод от генератора напряжения
- 7 – генератор напряжения
- 8 – измерительный элемент канала напряжения
- 9 – измерительный элемент канала силы тока

Схема подключения ЕСИТ-1 (ток + напряжение)

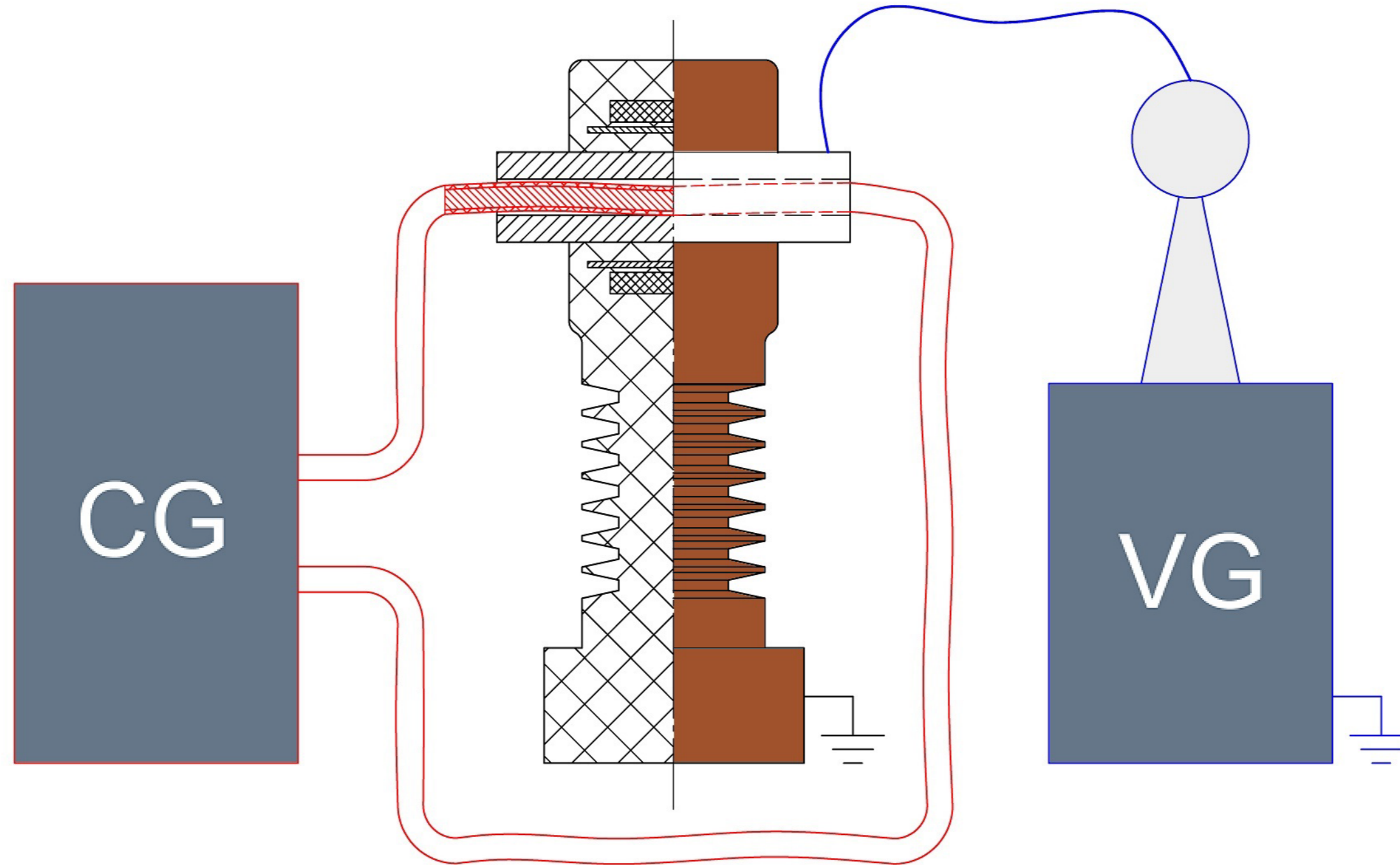
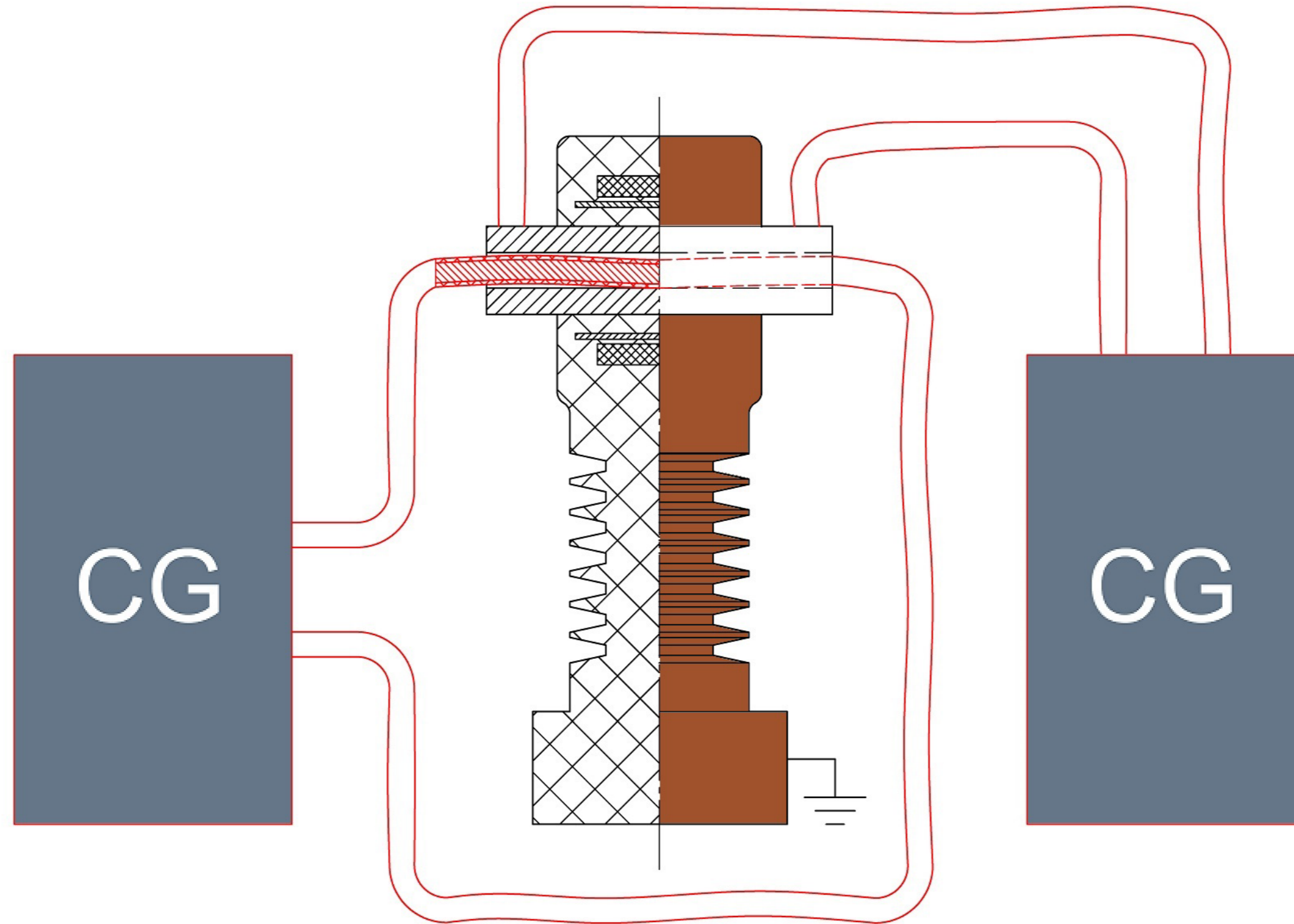
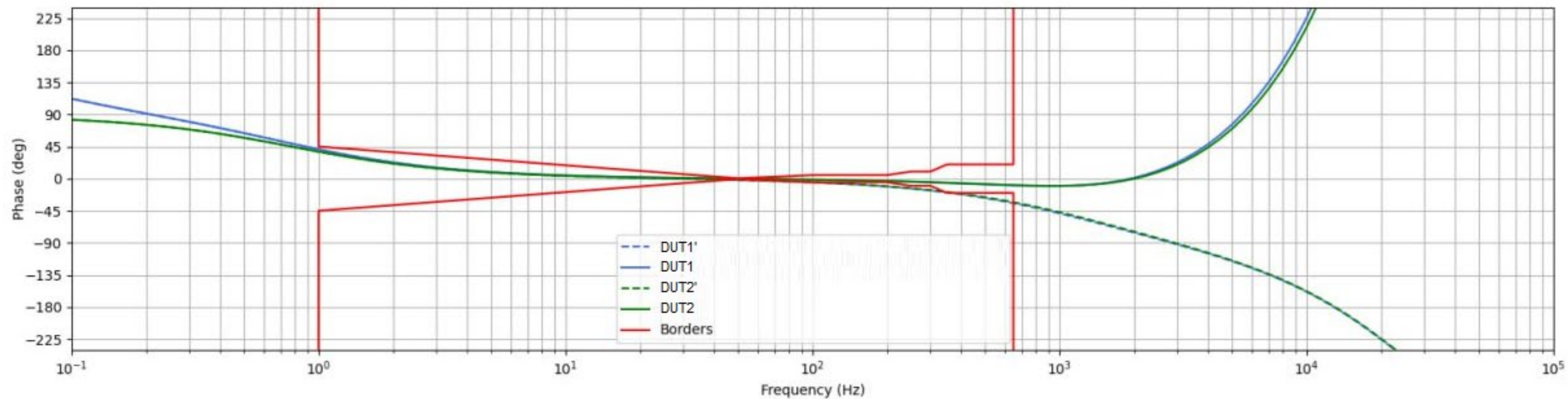
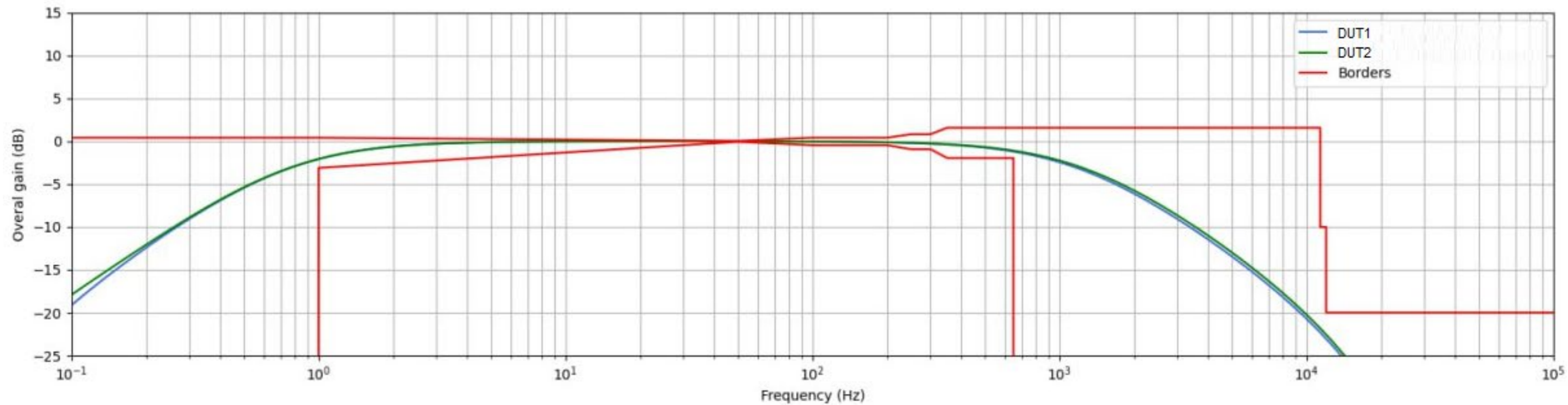


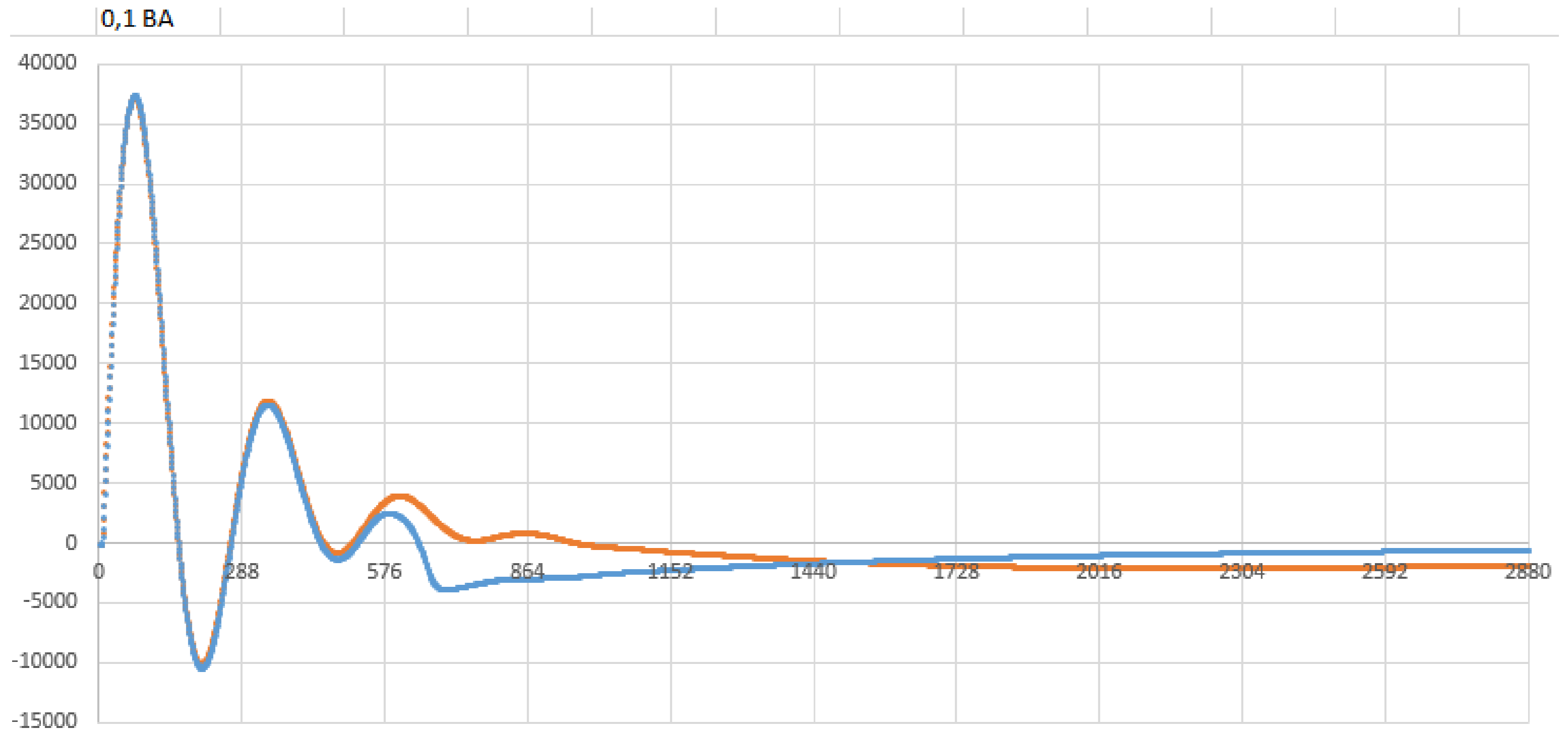
Схема подключения ЕСИТ-1 (ток + ток)



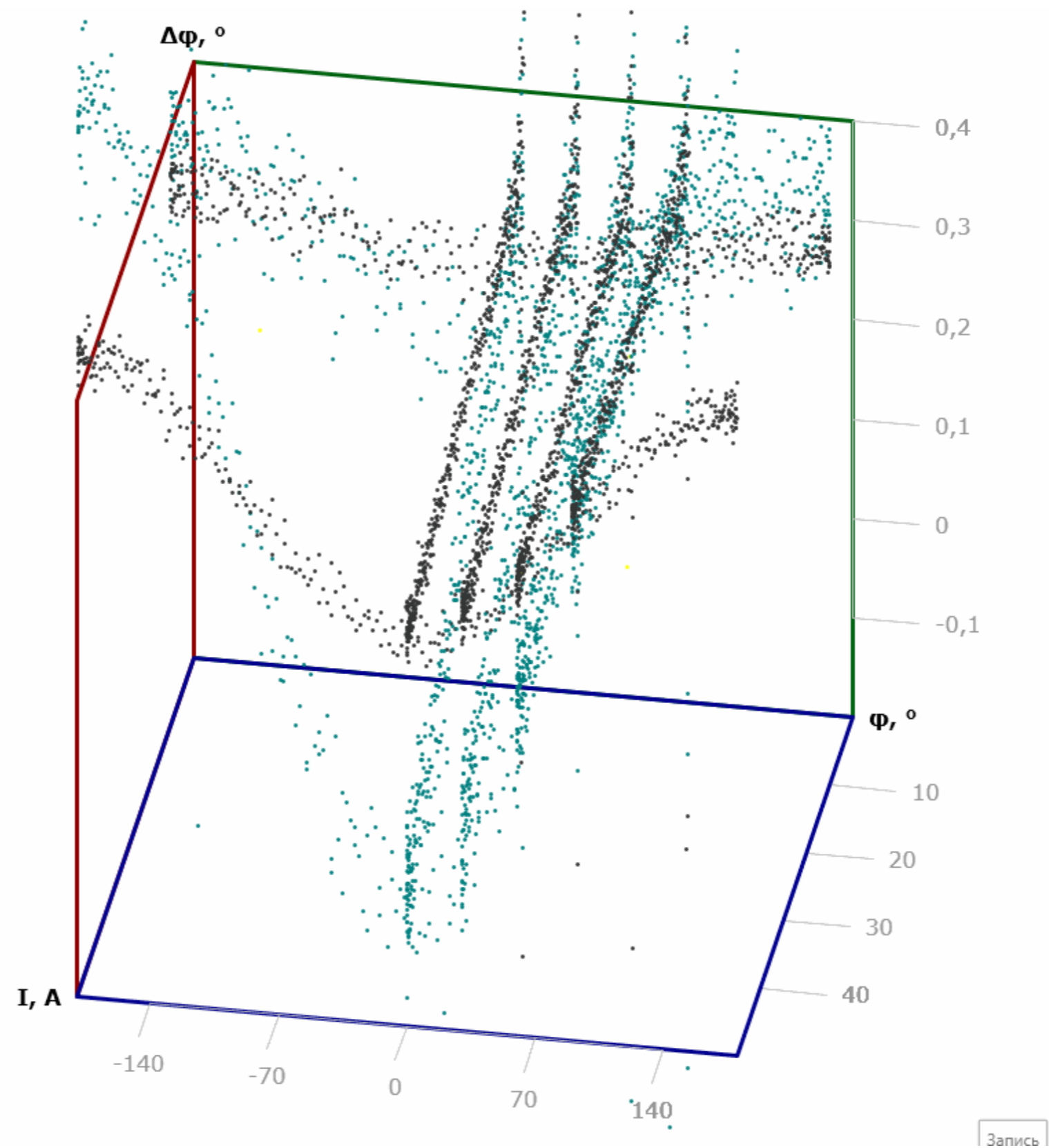
AЧХ, ФЧХ



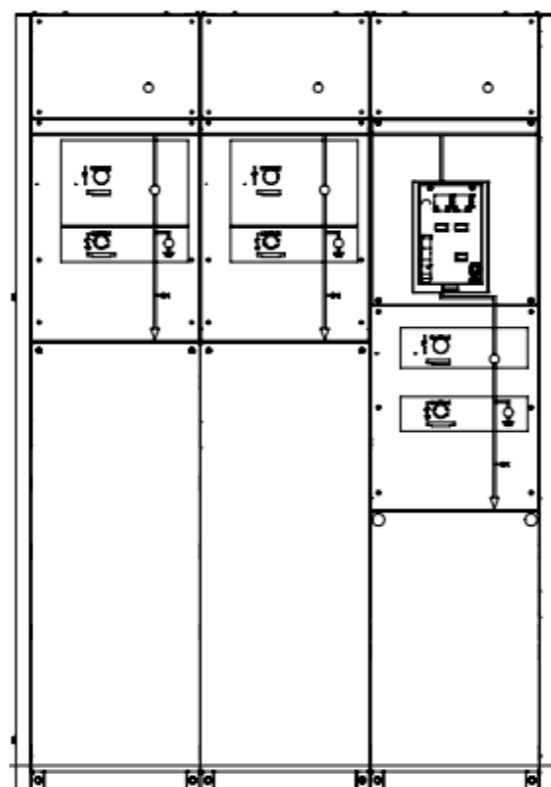
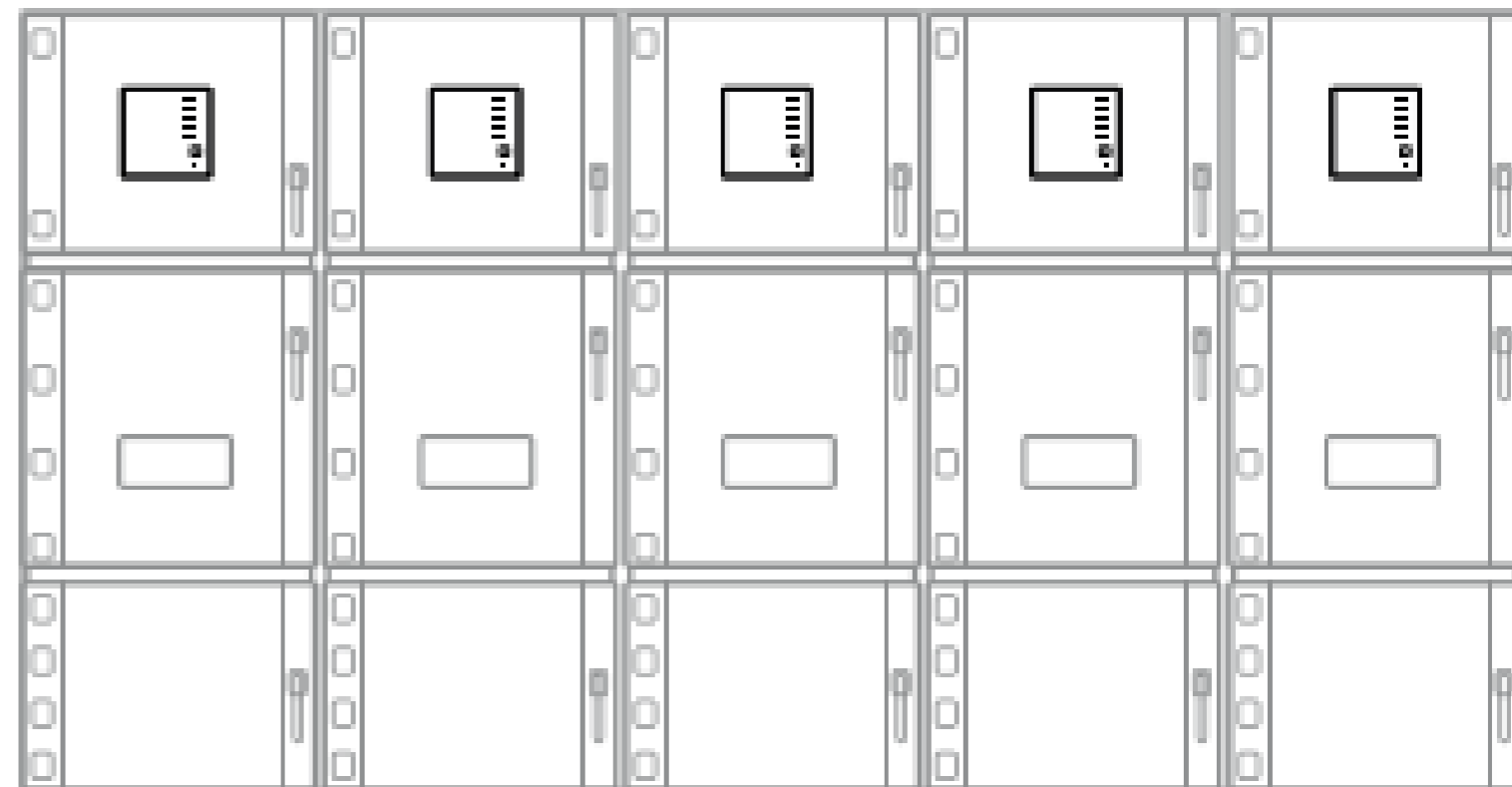
Переходный режим



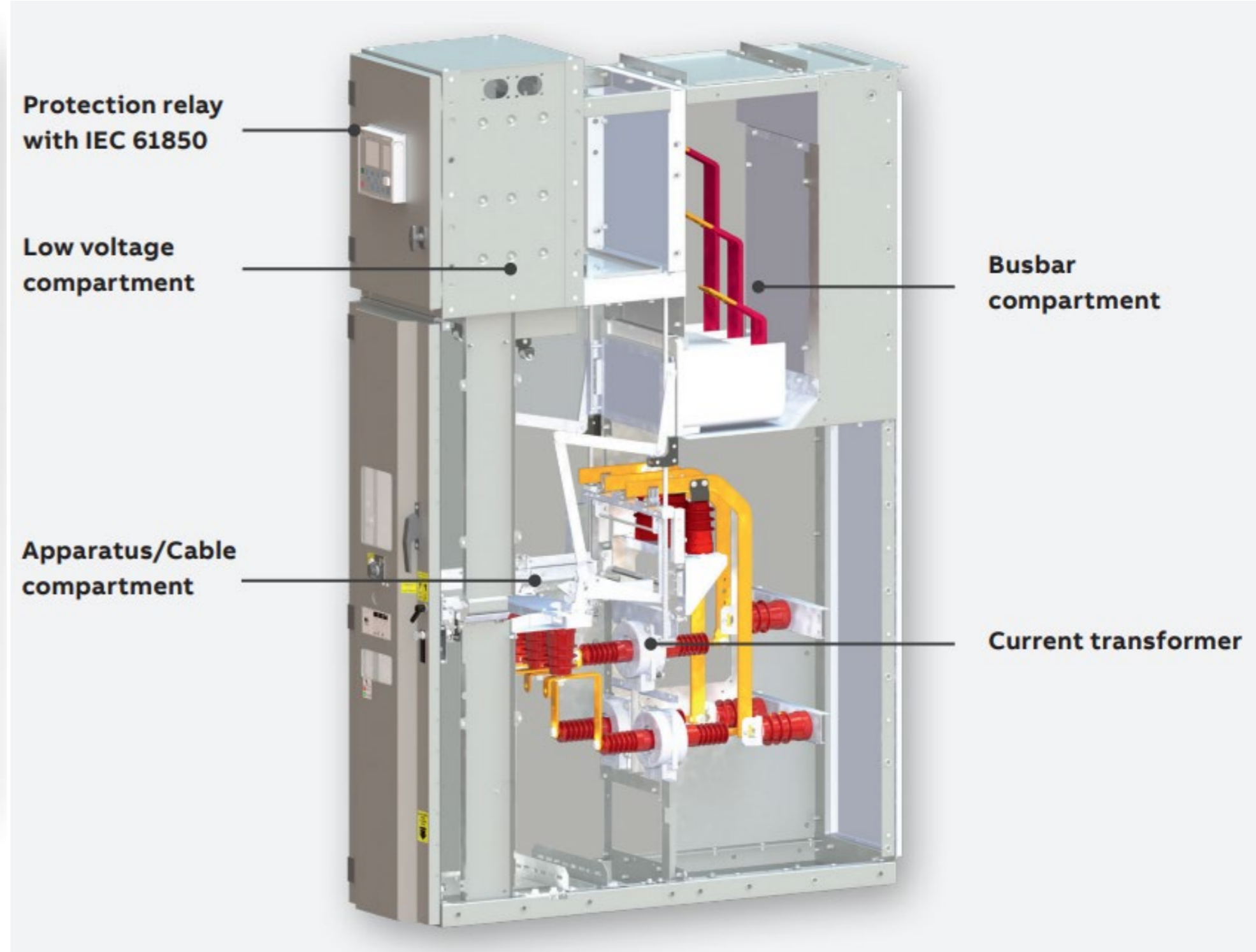
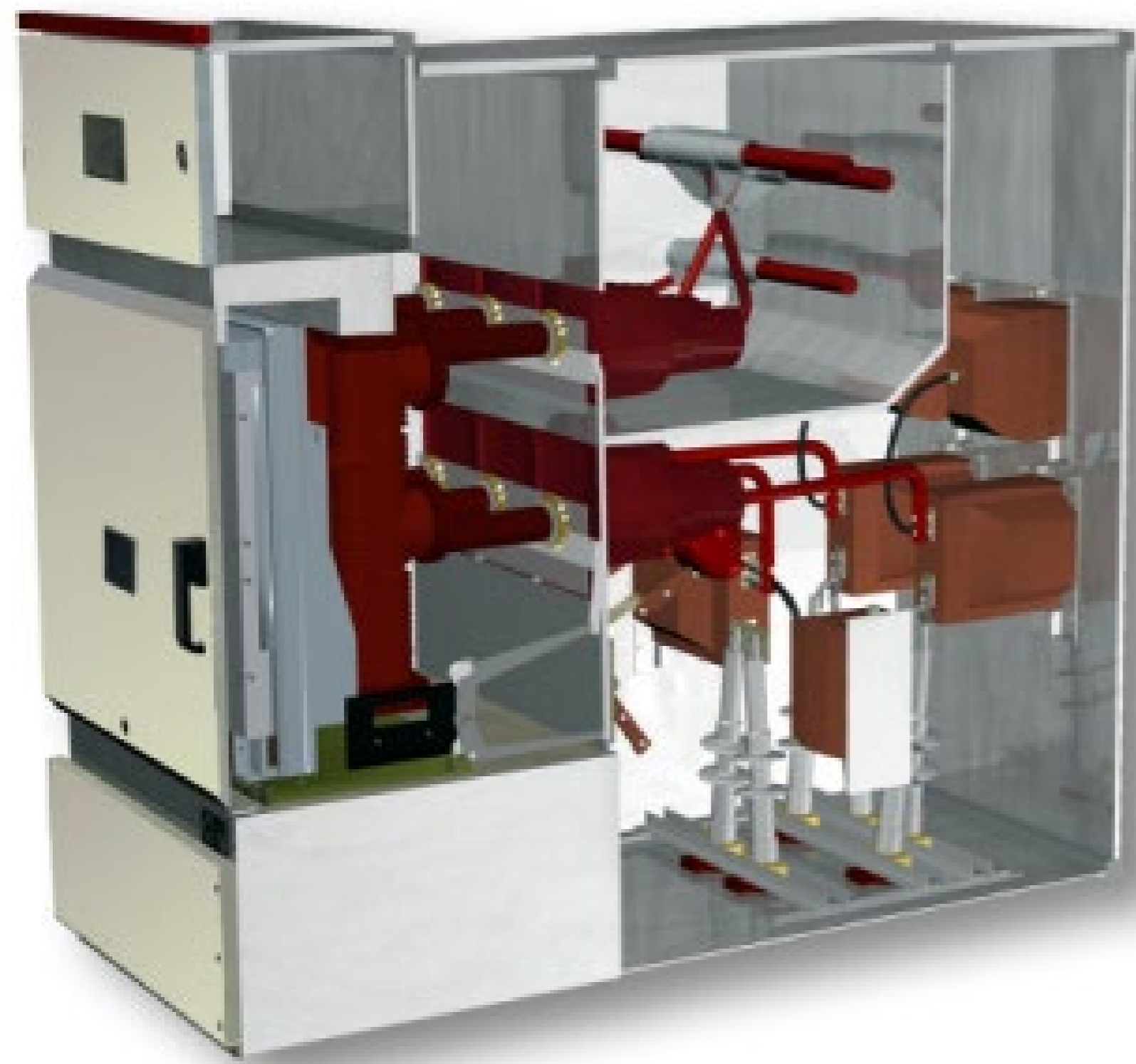
Погрешность трансформаторной схемы включения



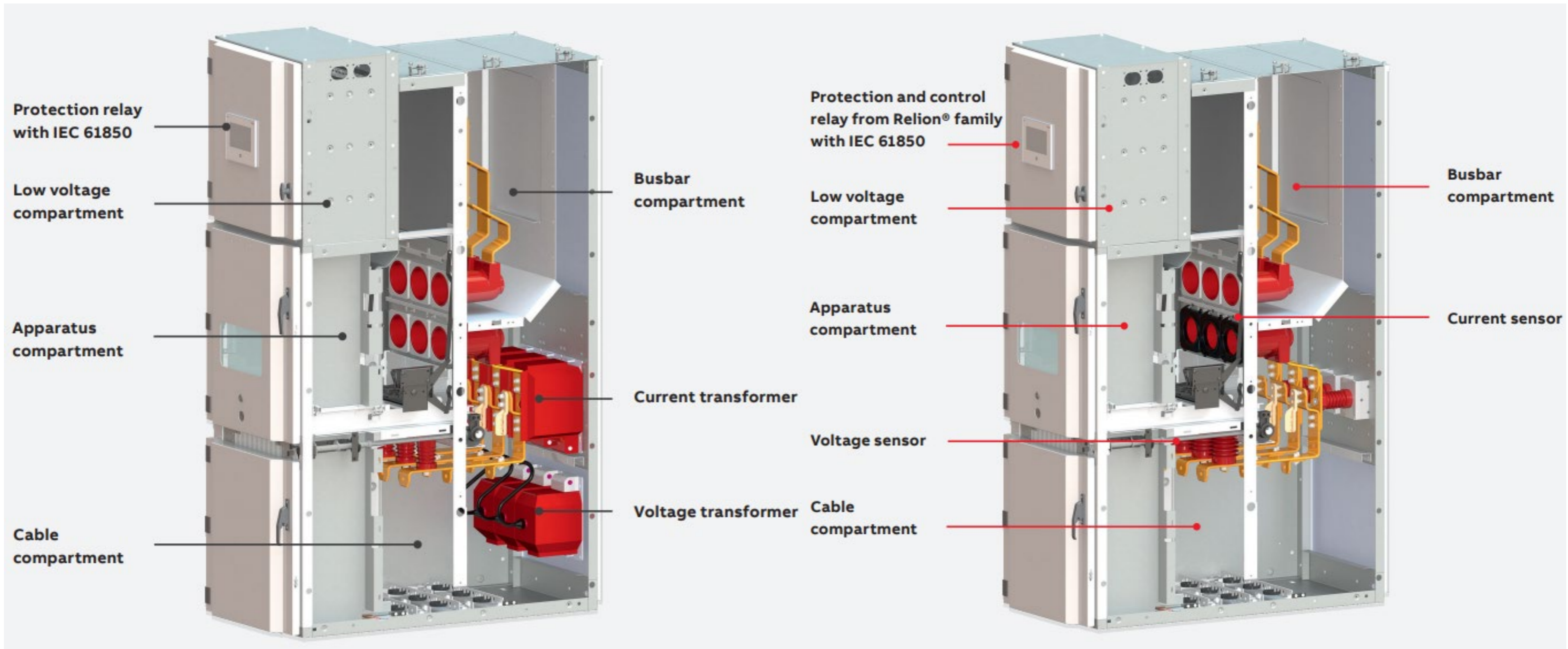
Уменьшение размеров



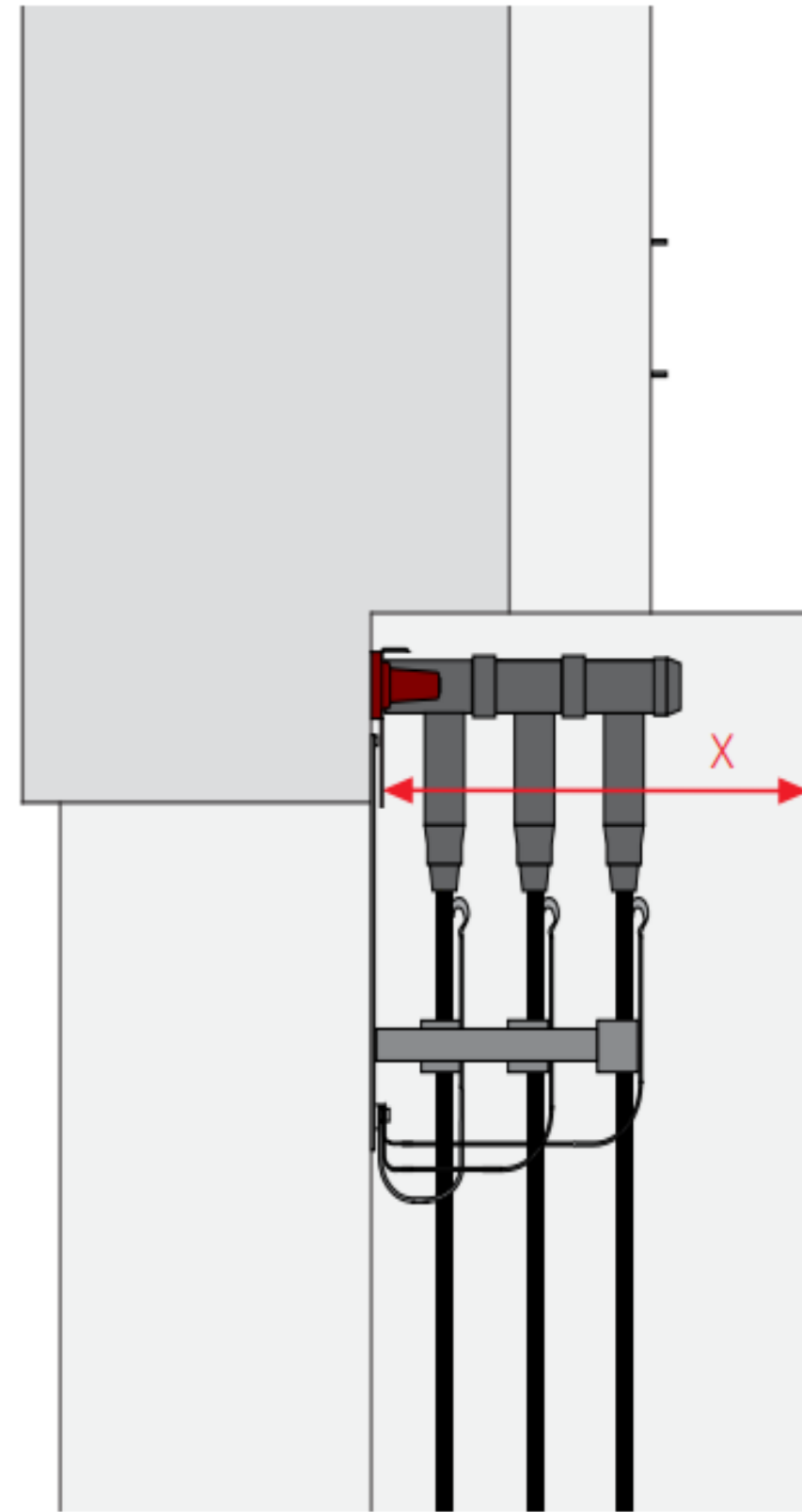
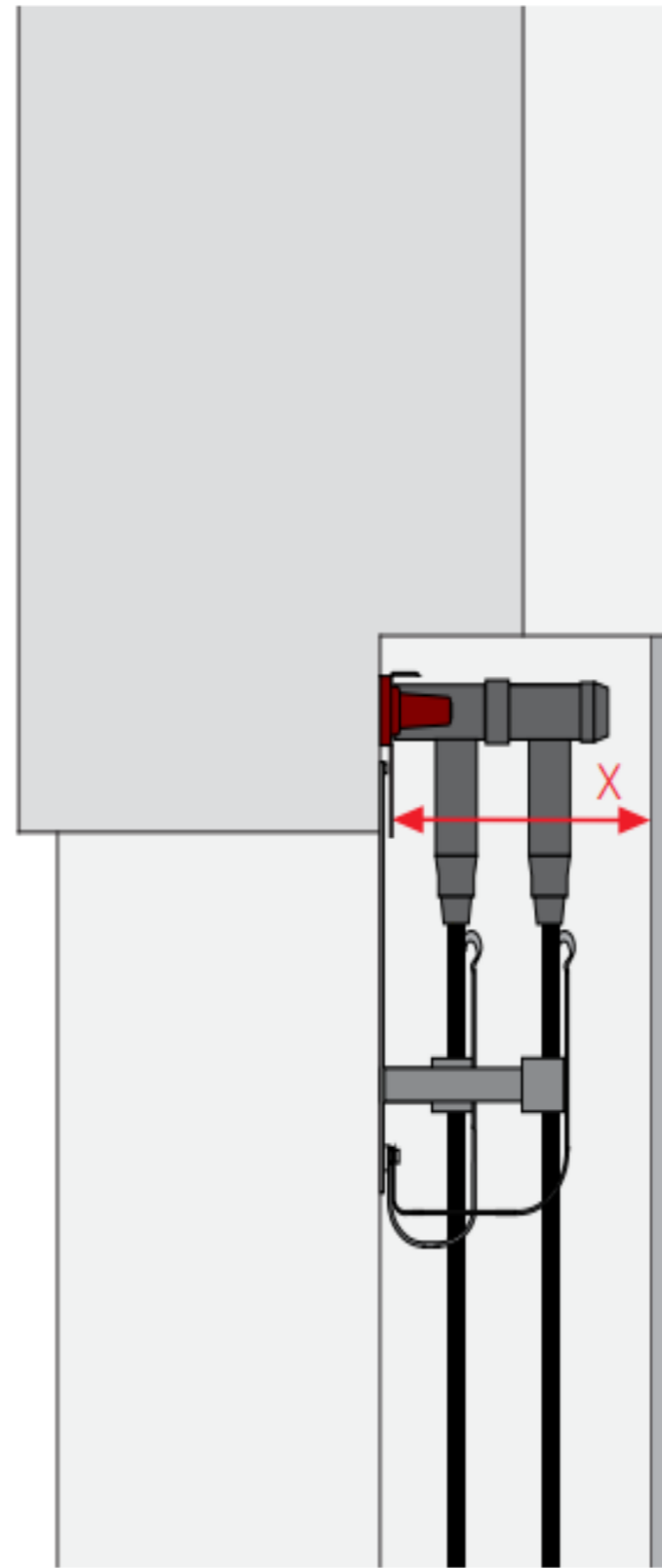
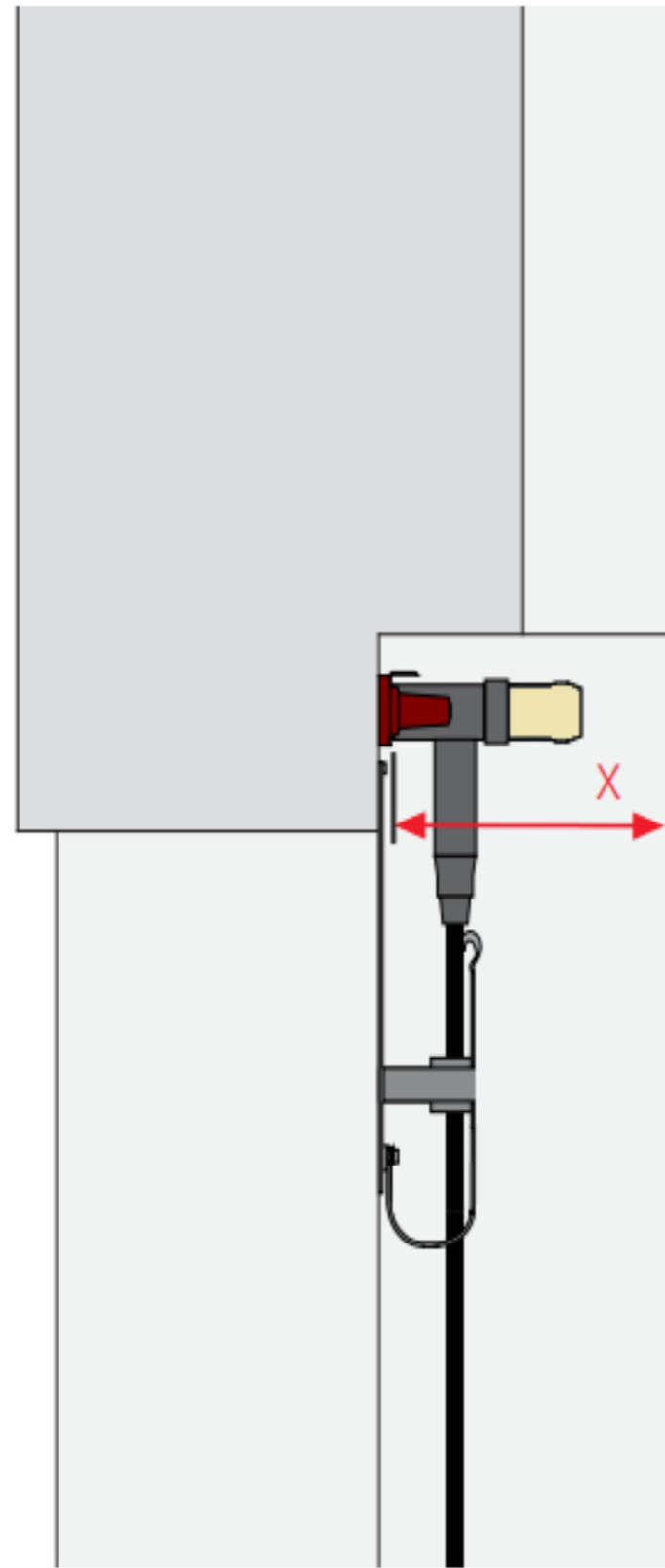
Эволюция ячеек с воздушной изоляцией



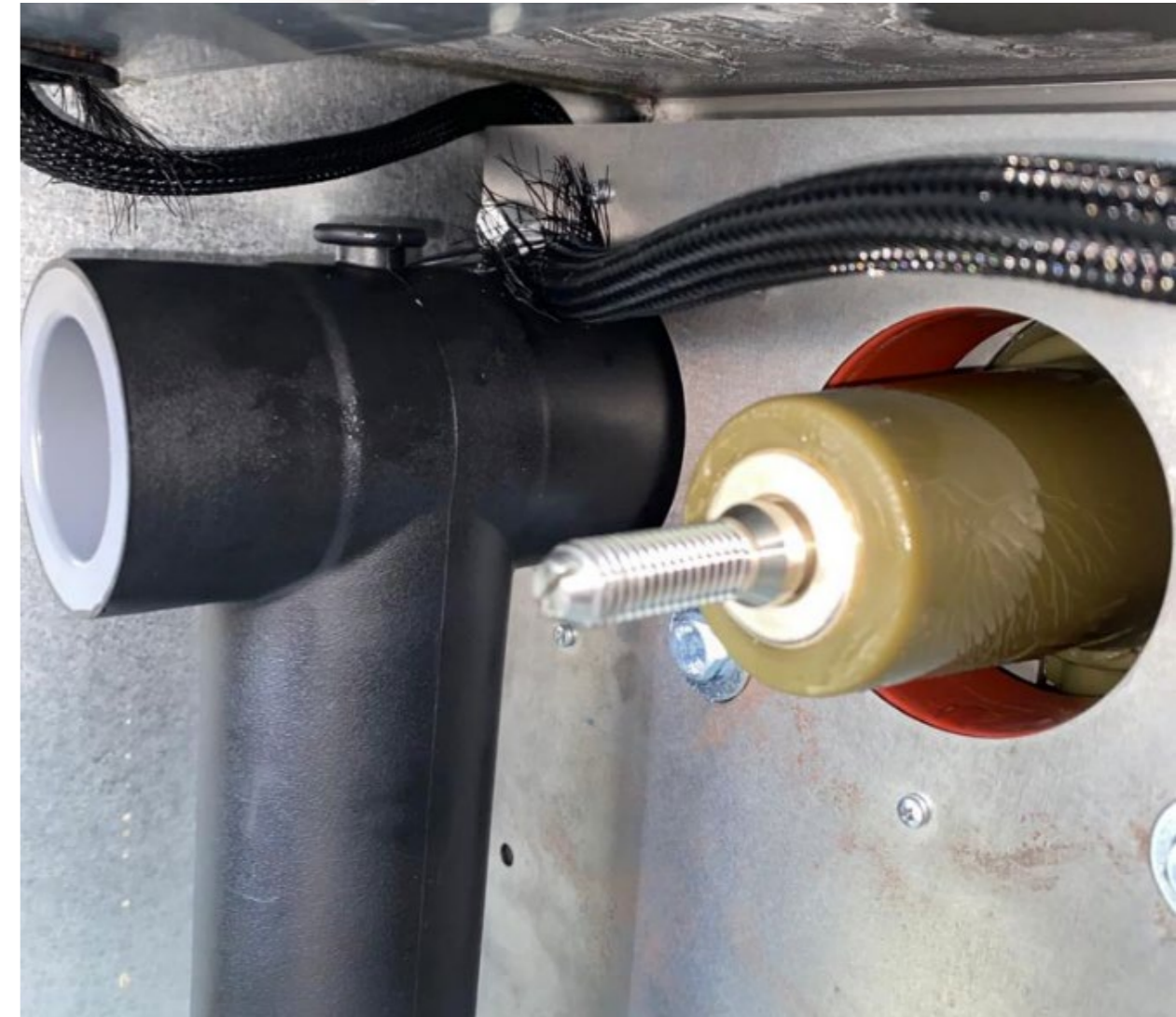
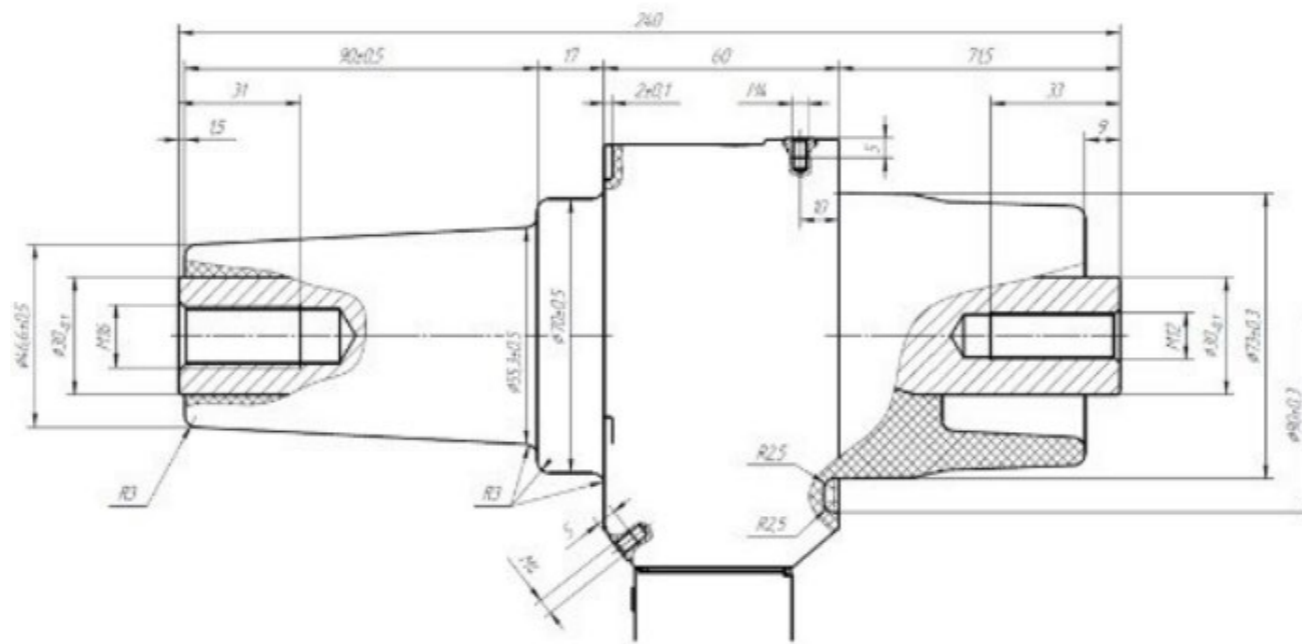
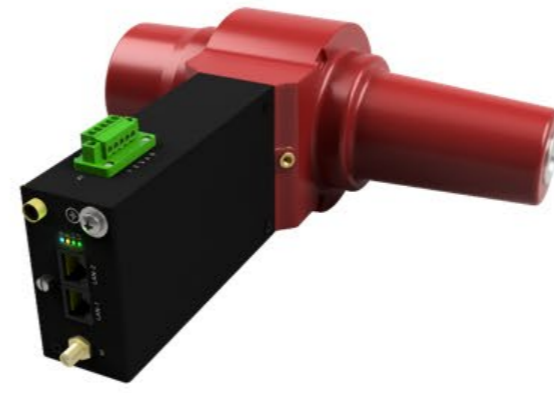
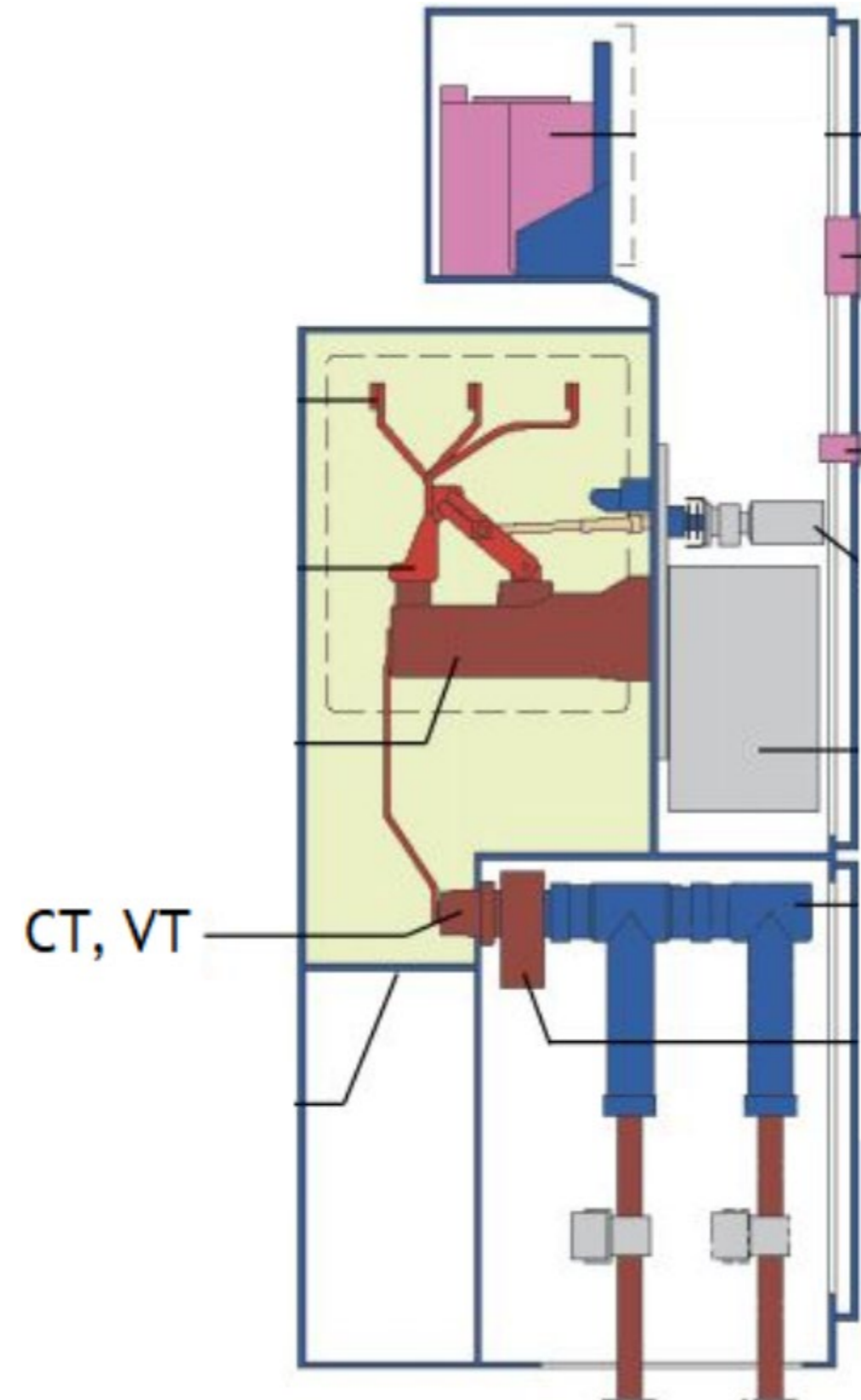
Эволюция ячеек с воздушной изоляцией



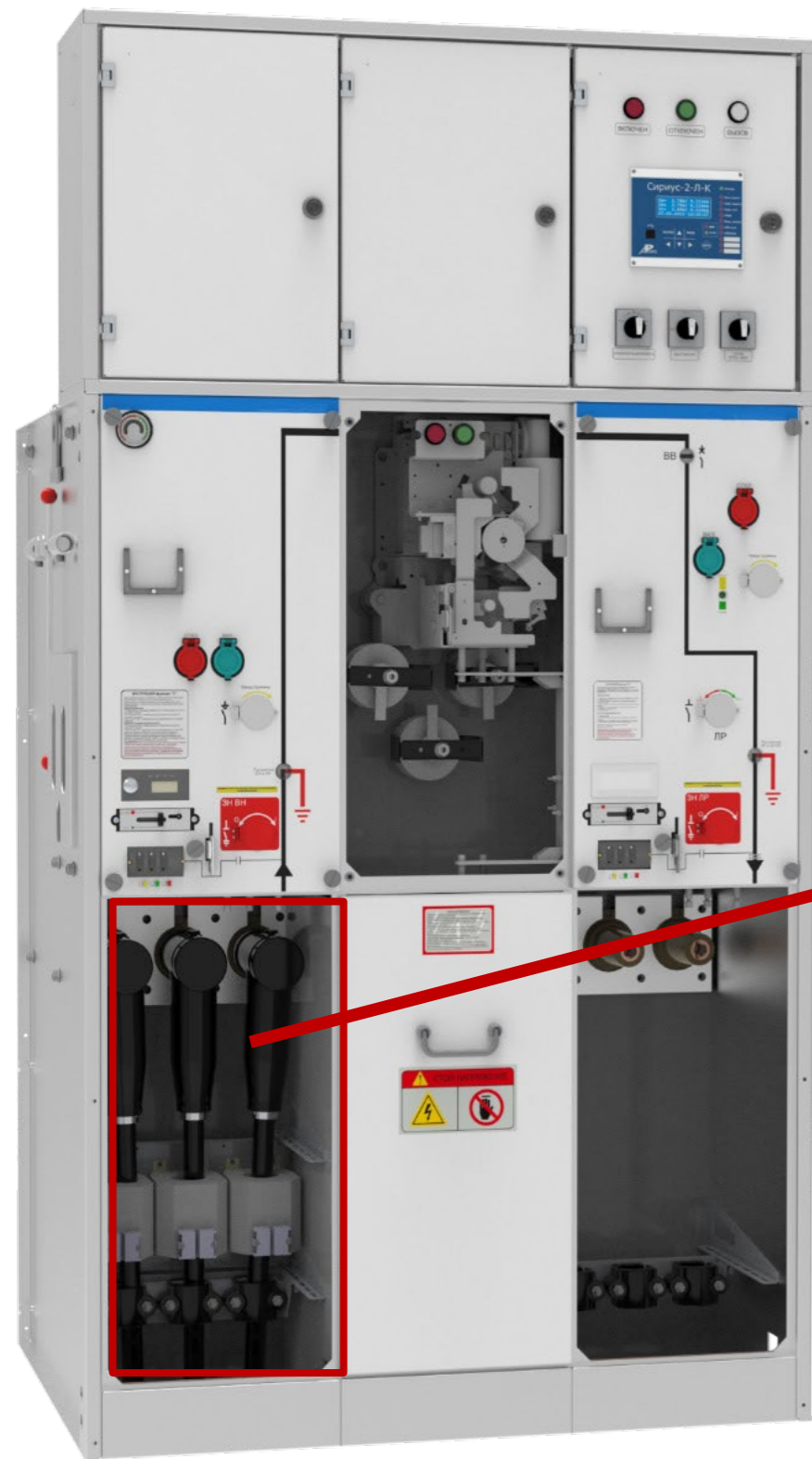
Нет места для ТТ, ТН



Измерения в проходном изоляторе



5 - Внешний вид КРУЭ 12/24/35 кВ



Fluorine 12/24/35 кВ

ECIT-3-20-50(1250)-TX2-24-R

Нет доступа к первичным цепям

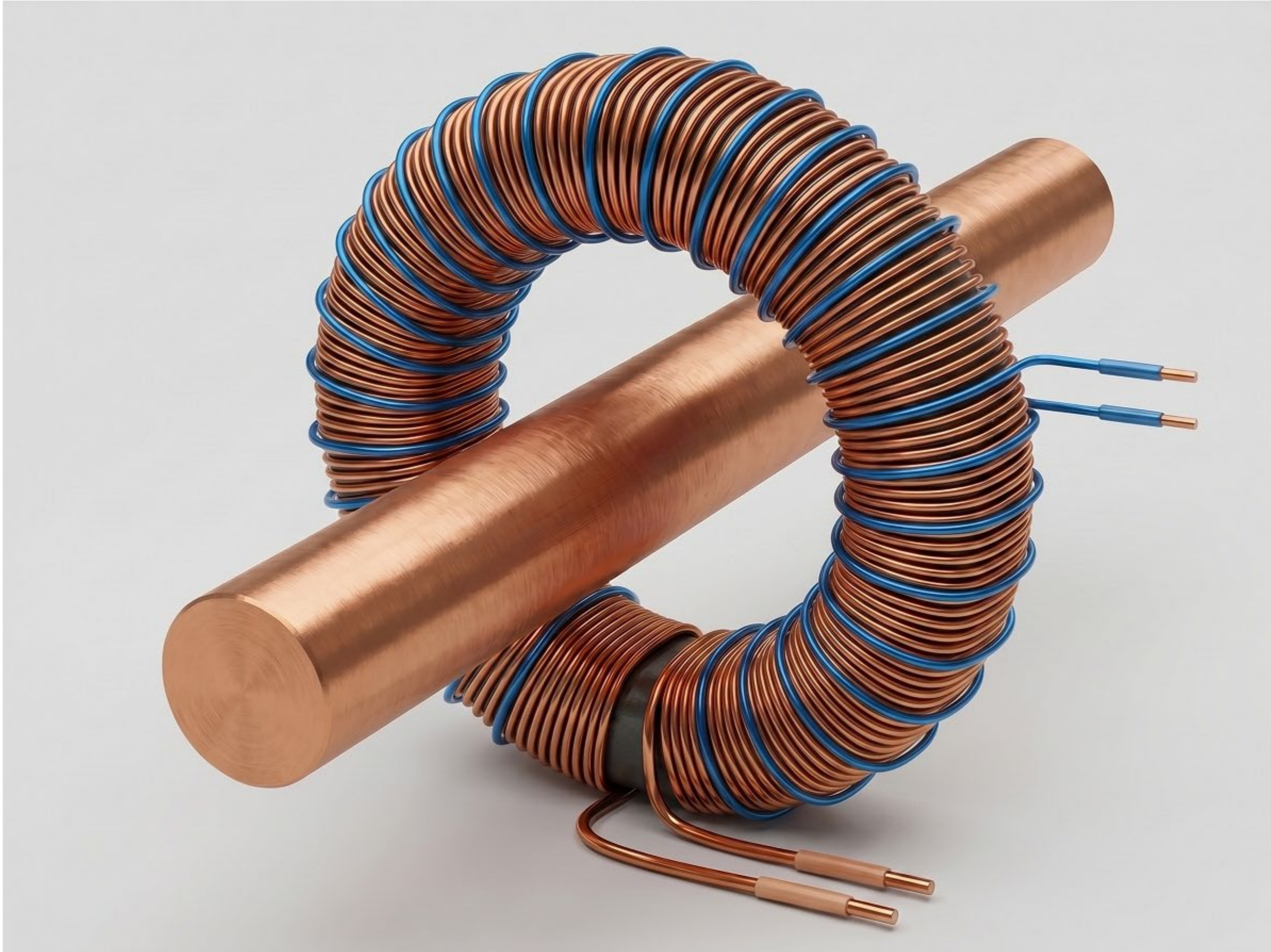


ECIT-1 в составе реклоузера



ECIT-3 в составе КРУЭ

ECIT-3



Заключение

Предложенный способ позволяет одновременно подавать ток и напряжение от независимых маломощных генераторов, открывая возможность имитации сложных сигналов (переходных процессов с апериодической составляющей или комбинации гармоник)

С помощью дополнительной испытательной обмотки и выделенного аналогового входа по напряжению обеспечивается полная тестируемость всех алгоритмов без доступа к первичным цепям и без нарушения герметичности

Эти решения превращают современный комбинированный трансформатор в функционально насыщенный, но при этом полностью проверяемый элемент, готовый к эксплуатации в составе цифровых подстанций.

Спасибо за внимание

Плакидин Роман Сергеевич

ведущий инженер по метрологии
rplakidin@ens.ru



Комбинированные измерительные трансформаторы с цифровым выходом в сетях 6–35 кВ: метрологические задачи и способы их решения

*Р.С. Плакидин, Д.Н. Ульянов, А.В. Мокиев
ООО «Инженерный центр «Энергосервис»*

Ключевые слова

Комбинированный трансформатор, погрешность фазового сдвига, погрешность разницы углов, маломощный трансформатор, КРУЭ, встраиваемые трансформаторы

Введение

На современном этапе развития энергетики цифровые технологии внедряются повсеместно, позволяя создавать полноценные системы автоматизации. Это касается как первичных измерительных преобразователей (измерительных трансформаторов), так и устройств автоматики (счетчики, терминалы РЗА). Параллельно прослеживается устойчивое стремление к компактности решений и уменьшению массогабаритных размеров распределительных устройств и их компонентов.

Вместе с тем, цифровая трансформация и ужесточение требований к компактности не снимают, а усложняют измерительные задачи. Возникают новые метрологические проблемы, которые необходимо последовательно решать на всех этапах жизненного цикла оборудования - от конструирования и схемотехники до калибровки и поверки в условиях ограниченного пространства.

Тенденции развития измерений в распределительной сети

В сетях 6-35 кВ необходимость радикально уменьшить габариты распределительных устройств возникла из практических задач: реконструкция и уплотнение существующих подстанций без расширения строительной части; размещение оборудования в стеснённой городской застройке или в мобильных модулях; снижение веса и упрощение транспортировки; экономия дорогой площади в промышленных узлах.

Традиционные воздушные промежутки на напряжение 6-35 кВ требовали соблюдения больших изоляционных расстояний, что принципиально ограничивало возможности уменьшения габаритов. Решением стал переход к изоляционным средам с более высокой электрической прочностью, чем воздух, способные при том же классе напряжения сократить промежутки в несколько раз. Эта задача привела к появлению и массовому внедрению: элегазовых ячеек (КРУЭ) - газ под давлением обладает значительно лучшими изоляционными

свойствами; твердой экранированной изоляции (SISS) - диэлектрический компаунд с заземлённым экраном позволяет покрывает токоведущие части сплошным слоем, исключив воздушные зазоры.

В итоге объем ячейки с твердой изоляцией в 3–5 раз меньше, чем у традиционной с воздушной изоляцией. Ширина ячейки снизилась с 1000 до 375 мм. Кроме уменьшения размеров, такая конструкция повышает безопасность, исключая прикосновение к высоковольтным элементам, и продлевает срок службы, снижая затраты на обслуживание, приближая его к концепции необслуживаемого устройства.

С появлением этих технологий изоляции ограничителем габаритов стали уже не изоляционные промежутки, а размеры измерительных трансформаторов. Традиционные электромагнитные трансформаторы тока и напряжения, десятилетиями сохранявшие внушительные габариты, в такие ячейки физически не помещались. В стремлении к дальнейшему уменьшению габаритов ячеек, измерительные трансформаторы стали просто исключать из состава ячейки. Компактный шкаф оставался без части приборов учёта и защит. Этот разрыв между желаемым габаритом и необходимым функционалом стал стимулом для появления малогабаритных датчиков и трансформаторов.

Новые комбинированные измерительные трансформаторы с цифровым выходом, например ЕСІТ-1 (ФІФ №94207-24), не только экономят место в ячейке, но и предоставляют данные в цифровом формате по протоколу МЭК 61850-9-2 для целей защиты, автоматики и коммерческого учета.

Дальнейшая тенденция к уменьшению привела к тому, что такие трансформаторы стали размещать непосредственно на месте проходного изолятора — в перегородке между воздушным и элегазовым отсеками КРУЭ. Объединяя в себе функции трансформатора тока, трансформатора напряжения и встроенную микропроцессорную обработку, устройство способно обрабатывать первичные сигналы и вычислять все вторичные параметры. По сути, комбинированный измерительный трансформатор становится самостоятельным многофункциональным устройством, решающим задачи учёта, телемеханики и РЗА.

Применение комбинированных трансформаторов для измерений и учета

Измерительный канал в автоматизированная система управления (включая системы телемеханики, коммерческого учета, контроля качества электрической энергии) состоит из первичных измерительных преобразователей (измерительных трансформаторов), так и устройств автоматики (счетчики, интеллектуальные устройства). В зависимости от комбинации классов точности этих устройств, угла сдвига фаз между током и напряжением, загрузки присоединения отличается вклад в итоговую погрешность каждого из компонентов

измерительной системы. Самый большой вклад [1] будет иметь погрешность трансформаторной схемы подключения счетчика (обусловленная угловыми погрешностями ТТ и ТН). Для существенного уменьшения погрешности измерительного необходимо снижать компонент относительной погрешности трансформаторной схемы подключения [2], обусловленной угловыми погрешностями измерительных трансформаторов.

Один из способов снизить суммарную погрешность измерительного канала – использовать комбинированные измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Когда ТН и ТТ совмещены в одном устройстве, то есть возможность спроектировать компоненты так, чтобы угловые погрешности имели один знак и величину, снижая погрешность угла между током и напряжением. Нормирование в описании типа именно погрешности угла сдвига фаз даёт возможность непосредственно использовать её при расчёте полной погрешности измерительного канала мощности.

Другой способ снижения суммарной погрешности измерительного канала – реализация вычислительных функций, например расчёта энергии, непосредственно в самом комбинированном трансформаторе.

В любом случае, при исследованиях характеристик и испытании на утверждение типа потребуются одновременно подать ток и напряжение на комбинированный трансформатор. Поскольку конструкция данных трансформаторов не предусматривает возможности отдельного подключения первичных цепей тока и напряжения, и имеет общий токопровод (первичный высоковольтный ввод), к которому в условиях эксплуатации подключается высоковольтная линия.

В настоящий момент широко применяются генераторы тока, которые позволяют подать от 0 до 6000 А, и генераторы напряжения, которые позволяют подавать от 0 до 35000 В, с обеспечением необходимой точности. При этом типичная полная мощность таких генераторов не превышает 2 кВт. Однако, задача подать одновременно хотя бы 500 А и 2000 В не имеет простого решения, поскольку полная мощность такого генератора сигнала будет более 1 МВт.

Для решения данной измерительной задачи на этапе проектирования устройства необходимо предусмотреть соответствующую конструкцию испытуемого изделия для возможности подключения как совместное, так и отдельное подключение первичных цепей. Например, конструкцией комбинированного измерительного трансформатора ЕСИТ-1 предусмотрено сквозное отверстие в первичном токопроводе (рисунок 1б), через которое в процессе испытаний пропускают изолированный провод от генератора тока, подключают провод от генератора напряжения к первичному токопроводу, выполняют одновременную подачу сигналов тока и напряжения с независимых генераторов. Это позволяет проводить проверку характеристик одновременно по каналу тока и каналу напряжения, оценивать

взаимное влияние токов и напряжений, вычислять погрешность фазового сдвига между током и напряжением, погрешность мощности и энергии вычисляемых комбинированным трансформатором. Предлагаемое техническое решение защищено патентом [3].

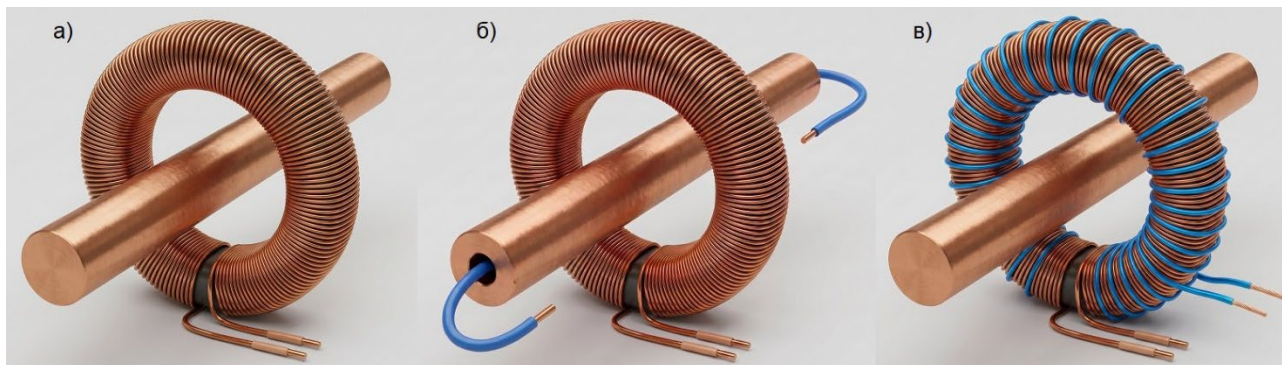


Рисунок 1 – Конструктивная схема трансформатора тока: а) первичный токопровод и вторичная обмотки трансформатора; б) с отверстием в первичном токопроводе; в) с испытательной дополнительной первичной обмоткой

Данный способ позволяет подать комбинированный сигнал тока от двух генераторов силы тока. Для этого сигнал от первого генератора подают на изолированный провод пропущенный через отверстие в первичном токопроводе, а сигнал от второго генератора тока подают непосредственно на первичный токопровод комбинированного трансформатора. Что позволяет в частном случае имитировать сигнал силы тока в переходном процессе состоящий из периодического сигнала с первого генератора и аperiodического сигнала со второго генератора. В этом случае трансформатор тока будет воспринимать комбинацию поданных сигналов. Либо подать комбинацию двух сигналов тока с синхронизированных генераторов: основной частоты с одного генератора и произвольную гармонику со второго генератора. Это позволяет исследовать частотные характеристики устройств контроля качества электрической энергии.

Применение комбинированных трансформаторов для РЗА

Наличие электронного блока у трансформаторов с цифровым выходом способствует миграции функций измерительных преобразователей и устройств РЗА в первичный измерительный преобразователь. Комбинированные измерительные трансформаторы с цифровым выходом могут включать в себя функции терминала релейной защиты. Например в комбинированной трансформаторе ЕСИТ-1 реализованы такие алгоритмы как МТЗ, ТО, ТЗНП, ЗОП, ЗДЗ, БНТ, ЗМН, ЗПН, ЛЗШ, УРОВ, КНГ, КОН, КНН, ОМП.

Однако столь глубокая интеграция функций в комбинации с компактностью современных ячеек порождает и новую нетривиальную проблему. Как и любые устройства релейной защиты, такие комбинированные трансформаторы требуют периодической

проверки - подтверждения (метрологических) характеристик и корректности работы защитных алгоритмов. Но если в традиционных схемах к трансформаторам и терминалам всегда можно было физически подключиться, то здесь доступ к ним в эксплуатации практически невозможен. В КРУЭ они располагаются внутри герметичного элегазового объема, в реклоузерах - на опоре, в моноблоке, где даже при полном обесточивании высоковольтный ввод остается неразъемным и недоступным для подачи сигналов от испытательного оборудования. Первичные цепи, куда раньше подавали ток и напряжение при тестировании, теперь физически закрыты. Возникает парадокс: устройство аккумулировало максимум функций, но проверить его стандартными методами, не нарушая конструкцию, уже невозможно.

Выходом является закладывание соответствующих решений на этапе проектирования самого устройства. В конструкции комбинированного измерительного трансформатора ЕСИТ-1 для этой цели предусмотрена дополнительная испытательная первичная обмотка (рис. 1в), выполненная внутри корпуса и гальванически изолированная от основного токопровода. Её выводы выведены на легкодоступные низковольтные клеммы, не требующие нарушения герметизации отсека или разборки высоковольтных соединений. При испытаниях на эту обмотку от портативного источника подаётся ток, величина которого, как правило, не превышает нескольких ампер. Принципиально важным является то, что число витков испытательной обмотки $w_{\text{исп}}$ выбрано достаточно большим. Таким образом, даже умеренный ток, поданный в низковольтную многовитковую обмотку, воспринимается чувствительным элементом трансформатора как первичный ток, соизмеримый по величине с токами короткого замыкания. Появляется возможность не только проверить амплитудные и фазовые погрешности цифрового измерительного канала, но и всесторонне протестировать корректность срабатывания всех реализованных в устройстве алгоритмов релейной защиты в условиях, максимально приближённых к реальным эксплуатационным. Предлагаемое техническое решение защищено заявкой на патент. [4]

Для проверки канала напряжения в конструкции ЕСИТ-1 также реализован дополнительный испытательный вход. На эти клеммы от портативного генератора подается испытательное напряжение, которое через согласующие цепи заводится непосредственно в электронный блок, минуя высоковольтную часть трансформатора. Такое решение, как и в случае с током, позволяет проводить полный цикл испытаний без подачи высокого напряжения на первичный ввод.

Более того, появляется возможность одновременной отдельной подачи тока (через испытательную обмотку) и напряжения (через испытательный вход), что позволяет имитировать любые углы сдвига фаз и тестировать корректность вычисления активной и

реактивной мощности, направленных защит и алгоритмов, чувствительных к чередованию фаз, не приближаясь к частям установки, находящимся под высоким потенциалом.

Заключение

Эволюция распределительных сетей 6–35 кВ в сторону компактности и цифровизации привела к появлению комбинированных измерительных трансформаторов с цифровым выходом, которые не только экономят место, но и выполняют функции учёта, телемеханики и РЗА.

Предложенные в статье методы испытаний решают две ключевые проблемы таких устройств:

- использование сквозного отверстия в первичном токопроводе позволяет одновременно подавать ток и напряжение от независимых маломощных генераторов, открывая возможность имитации сложных сигналов - например, переходных процессов с аperiodической составляющей или комбинации гармоник - для исследования частотных характеристик и функций контроля качества электрической энергии;

- с помощью дополнительной испытательной обмотки и выделенного аналогового входа по напряжению обеспечивается полная тестируемость всех алгоритмов без доступа к высоковольтному вводу и без нарушения герметичности.

В совокупности эти решения превращают современный комбинированный трансформатор в функционально насыщенный, но при этом полностью проверяемый элемент, готовый к эксплуатации в составе цифровых подстанций.

Литература

1. Плакидин Р.С., Ульянов Д.Н., Мокеев А.В. Как цифровые технологии меняют погрешности? // Мир измерений, 2024, № 2, с. 33–37.

2. Плакидин Р.С., Ульянов Д.Н., Мокеев А.В. Особенности разработки комбинированных измерительных трансформаторов // Мир измерений, 2025, № 3, с. 62–64.

3. Способ проверки метрологических характеристик комбинированного измерительного трансформатора тока и напряжения : пат. 2837035; патентообладатель ООО «Инженерный центр «Энергосервис» (RU). - № 2024133486; заявл. 08.11.2024; опубл. 25.03.2025

4. Способ проверки метрологических характеристик комбинированного измерительного трансформатора тока и напряжения : патентообладатель ООО «Инженерный центр «Энергосервис» (RU).; заявл. 02.03.2026

Сведения об авторах

Плакидин Роман Сергеевич

Ведущий инженер по метрологии ООО «Инженерный центр «Энергосервис»

Ульянов Дмитрий Николаевич

Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис»

Мокеев Алексей Владимирович

Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис»

Тел.: +7(8182)657565*181

e-mail: rplakidin@ens.ru