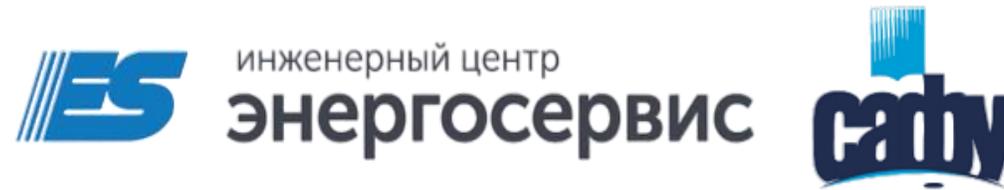


Научно-практическая конференция  
«Релейная защита и автоматизация энергосистем.  
Совершенствование эксплуатации и перспективы развития»  
**XXVI Международный форум «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ 2024»**



**Системы релейной защиты и автоматизации понизительных  
подстанций на базе интеграции технологий ВАПС и СВИ**

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

4 декабря 2024, г. Москва



## Традиционный подход

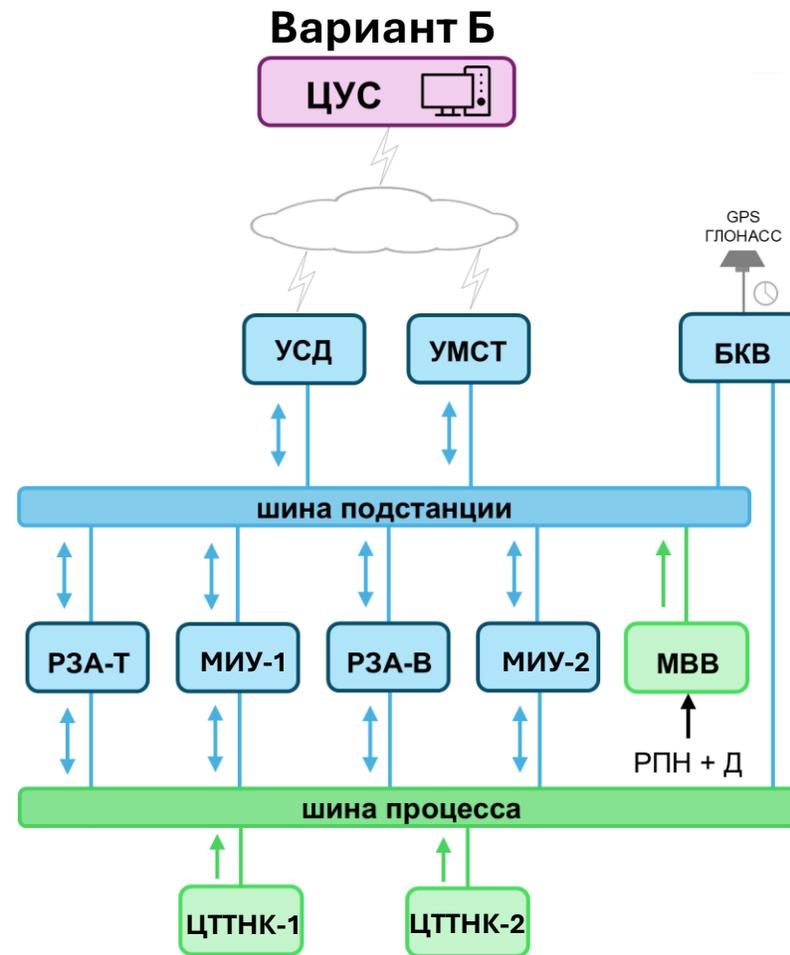
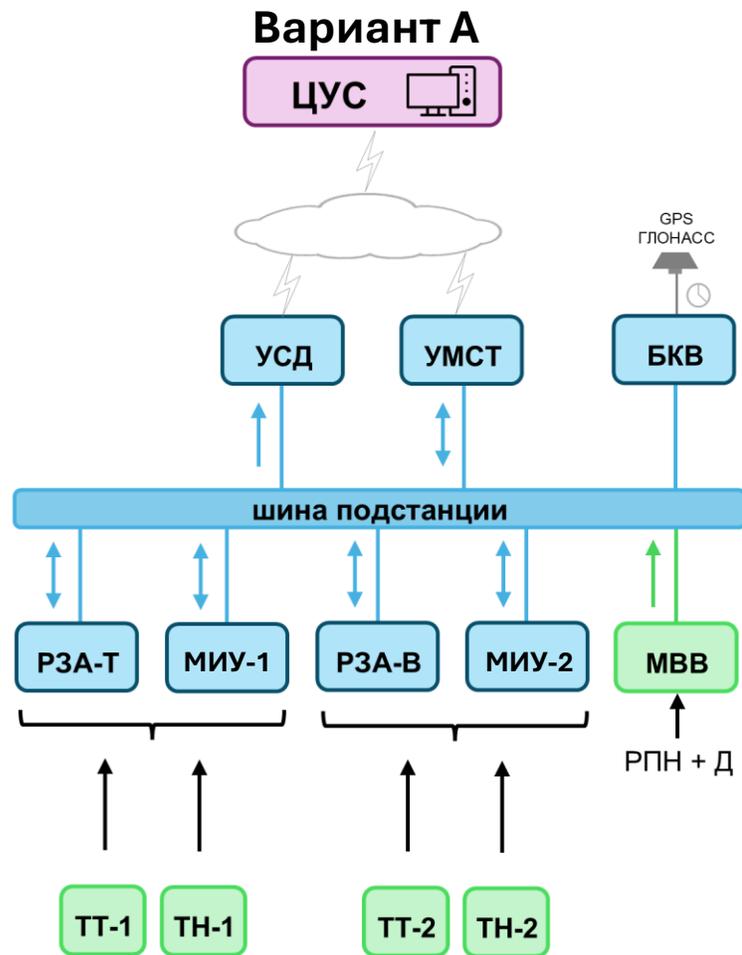
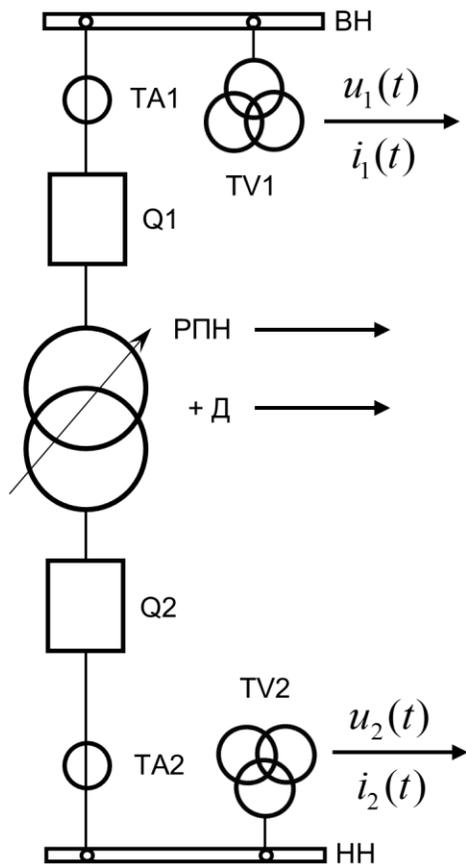


- раздельная реализация систем
- индивидуальные измерительные устройства
- собственные системы сбора данных и каналы связи

## Новый подход



- интеграция на основе технологий ВАПС и СВИ
- применение многофункциональных ИЭУ
- принцип «два устройства на присоединение»



**А – модернизируемые объекты, Б – вновь строящиеся объекты**

ЦУС – центр управления сетями, УСД – устройство сбора данных, УМСТ – устройство мониторинга состояния СТ, РЗА-Т – устройство защиты и автоматики СТ, МИУ – многофункциональное измерительное устройство (МИП + счетчик ЭЭ + ПКЭ + СВИ), БКВ – блок коррекции времени, МВВ – модуль ввода/вывода, Д – датчики дополнительных параметров, РЗА-В – РЗА ввода НН, ЦТТНК – цифровой трансформатор тока и напряжения (комбинированный)

## ВАРИАНТ А

- автоматизация существующих ПС,
- архитектура ВАПС II типа (А),
- постепенное расширение функций и возможностей подсистем,
- реализация системы мониторинга состояния СТ на основе преимущественного контроля его электромагнитных параметров

## ВАРИАНТ Б

- автоматизация новых ПС,
- архитектура ВАПС III или IV типа (Б),
- максимальное использование преимуществ ВАПС и технологии СВИ,
- приоритетное применение цифровых ТТ и ТН вместо ПАС и традиционных ТТ/ТН,
- формирование потоков синхровекторов (SP) по аналогии с SV потоками



- два многофункциональных ИЭУ с поддержкой СВИ на присоединение (РЗА + МИУ)
- реализация всех подсистем автоматизации
- интеграция данных от устройств РЗА и МИУ

$$u(t) = U_m(t) \cos \psi(t) = U_m(t) \cos \left( \int_0^t \omega(\tau) d\tau - \varphi \right)$$

$$\omega_{\Delta}(t) = \omega(t) - \omega_0$$

$$u(t) = U_m(t) \cos(\omega_0 t - \phi(t)) \quad \phi(t) = \int_0^t \omega_{\Delta}(\tau) d\tau - \varphi$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\phi(t)}{dt}$$

$$\dot{U}(t) = U_m(t) e^{j\phi(t)} = U_m(t) e^{j \left( \int_0^t \omega_{\Delta}(\tau) d\tau - \varphi \right)}$$

$$u(t) = \operatorname{Re}(\dot{U}(t) e^{j\omega_0 t})$$

Синхровектор напряжения

$$\dot{U}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m(t) e^{j\phi(t)}$$

Мгновенная частота

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\phi(t)}{dt}$$

синхронизация начала каждой секунды внутренних часов устройства с точностью не хуже **1 мкс относительно эталонных часов**

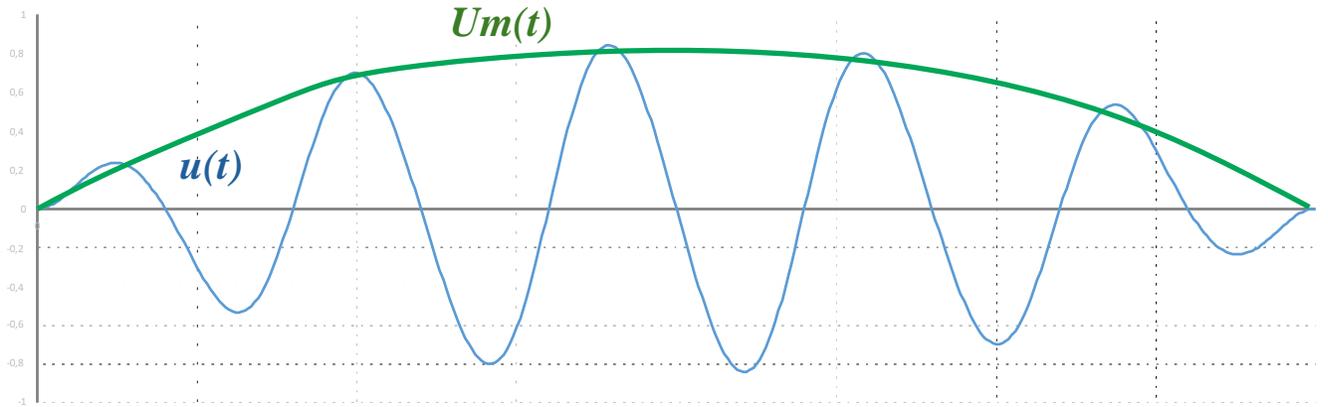


Рис.1 Обычное измерение – определение амплитуды

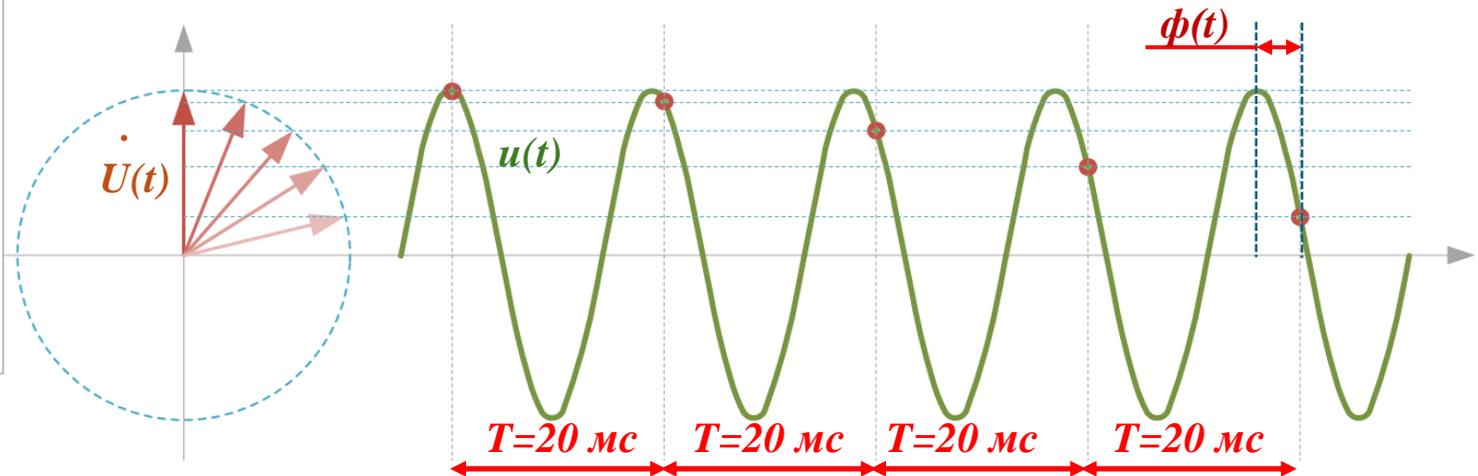


Рис.2 Синхровекторное измерение – определение амплитуды и фазы 1 гармоника сигнала

Основные определения и требования к СВИ изложены в:

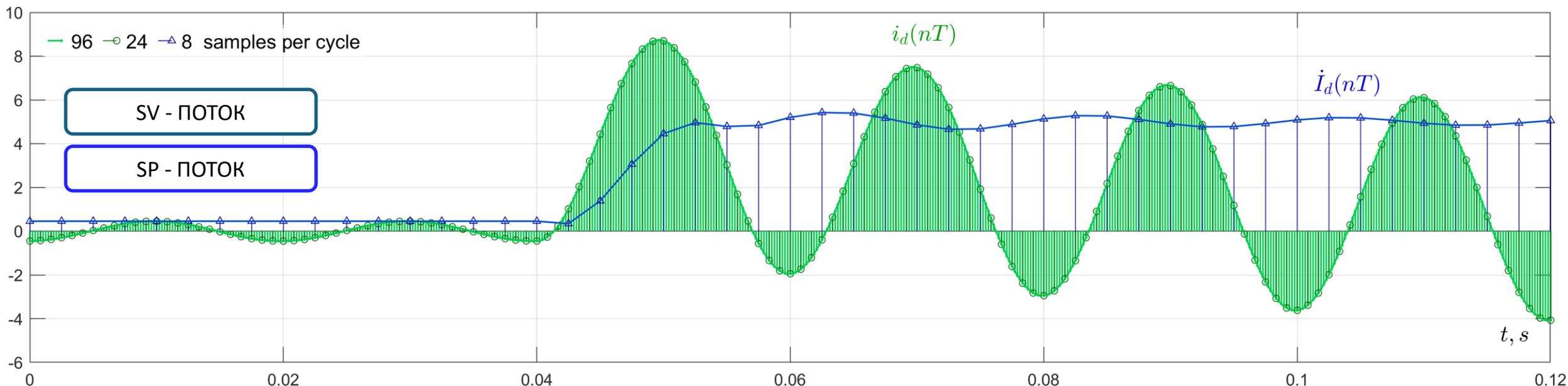
- Международные стандарты **IEEE C37.118 (США)** «Синхронизированные векторные измерения в электроэнергетических системах»
- Стандарт АО «СО ЕЭС» **СТО 59012820.29.020.011-2016 (Россия)** «Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования.»

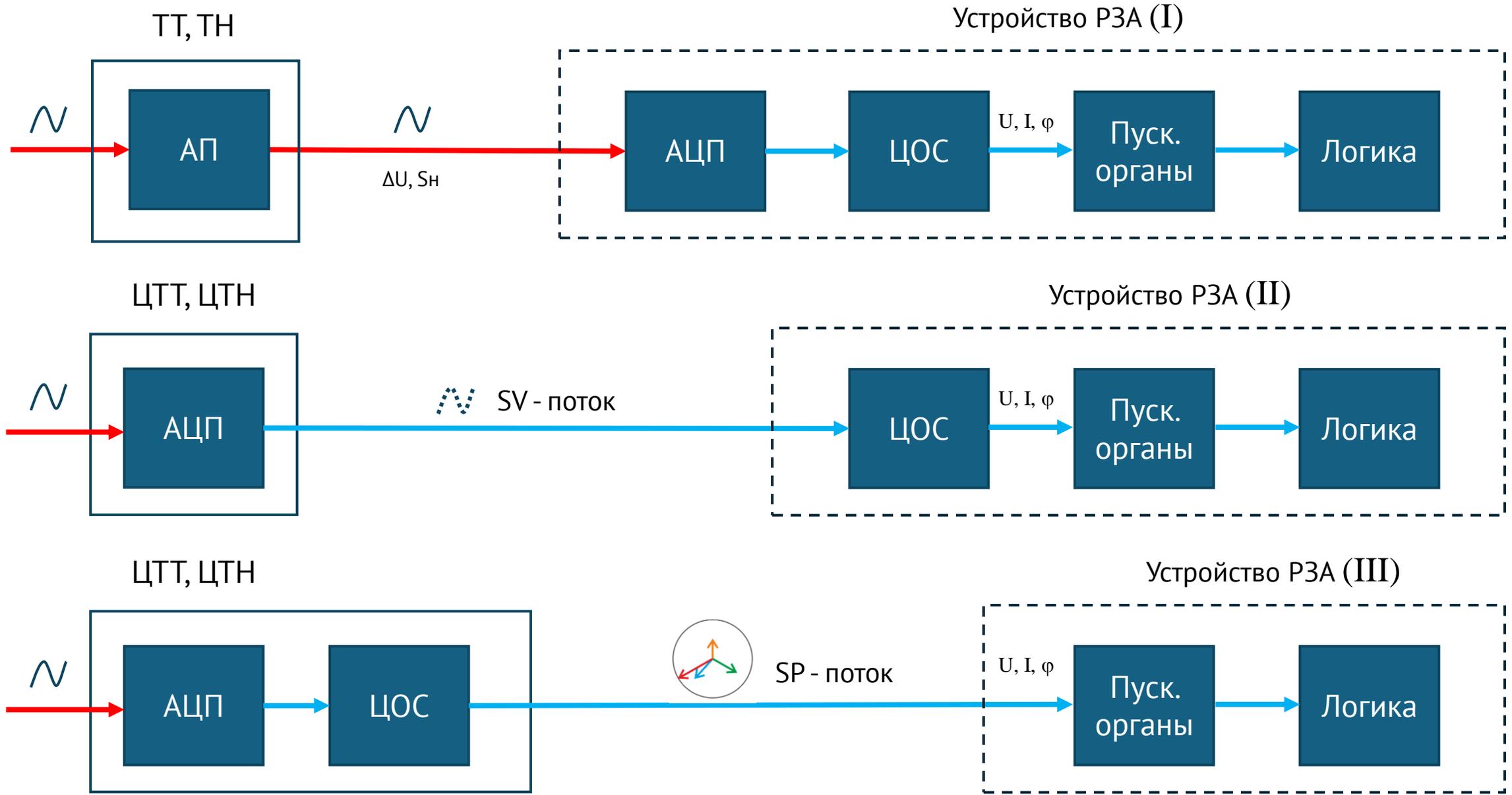
Класс точности СВИ	Размер окна фильтра, мс	Наложений окна на периоде 20мс	Время отклика, мс	Назначение	Протокол передачи, (кол-во измерений за период 20 мс)
<b>Class M</b> (C37.118.1)	160	1 – 4	140 – 280	СМПР, СМСТ	C37.118.2, (1-4)
<b>Class P</b> (C37.118.1)	60	1 – 4	40 – 120	СМПР, часть автоматики	C37.118.2, (1-4)
<b>Class S</b> (Ц Энергосервис)	30	96	16 – 20	РЗА, СМСТ	МЭК 61850-9-2, (8-96)
<b>Class R (RMS)</b> (ИЦ Энергосервис)	100	16	20-40	Учет ЭЭ, ПКЭ	МЭК 61850-9-2, (8-16)

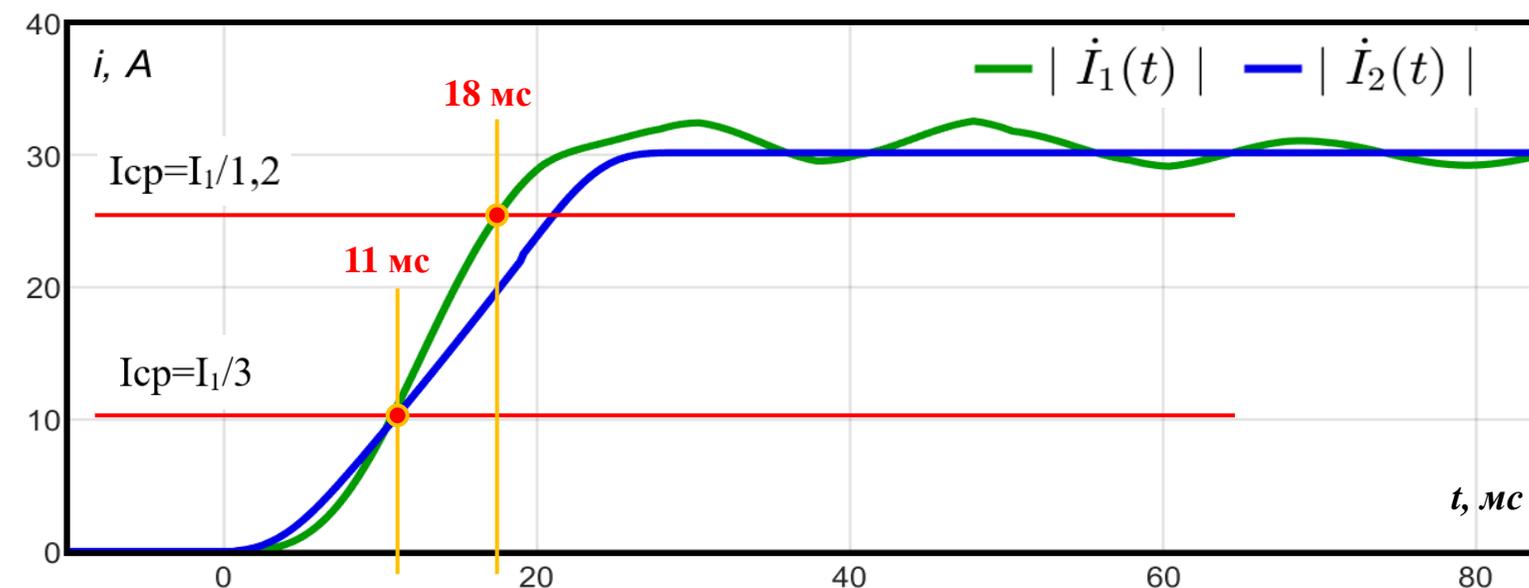
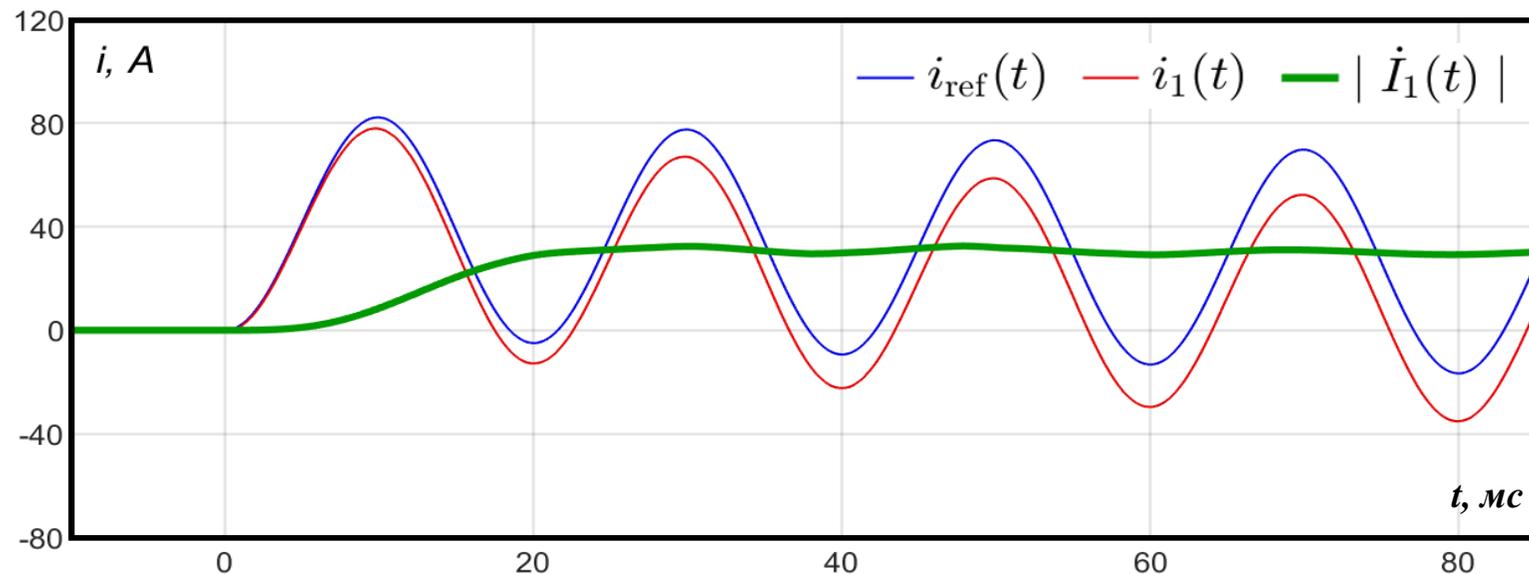
Сравнение объемов сетевого трафика для различных измерительных потоков, Мб/сек

Тип данных/ Кол-во измерений на T	96	24	16	8
SV IEC 61869-9 (4x $i$ + 4x $u$ )	3.7	-	-	-
3x однофазных SP IEC 61850-9-2	9.9	2.5	1.7	0.8
трехфазный SP IEC 61850-9-2	5.8	1.5	1	0.5

Снижение более чем в 3 раза по сравнению с SV







1. Задавался сигнал «тока КЗ» с действующим значением 30 А в установившемся режиме и с 2-х кратной аperiodической составляющей (постоянная времени 200 мс).

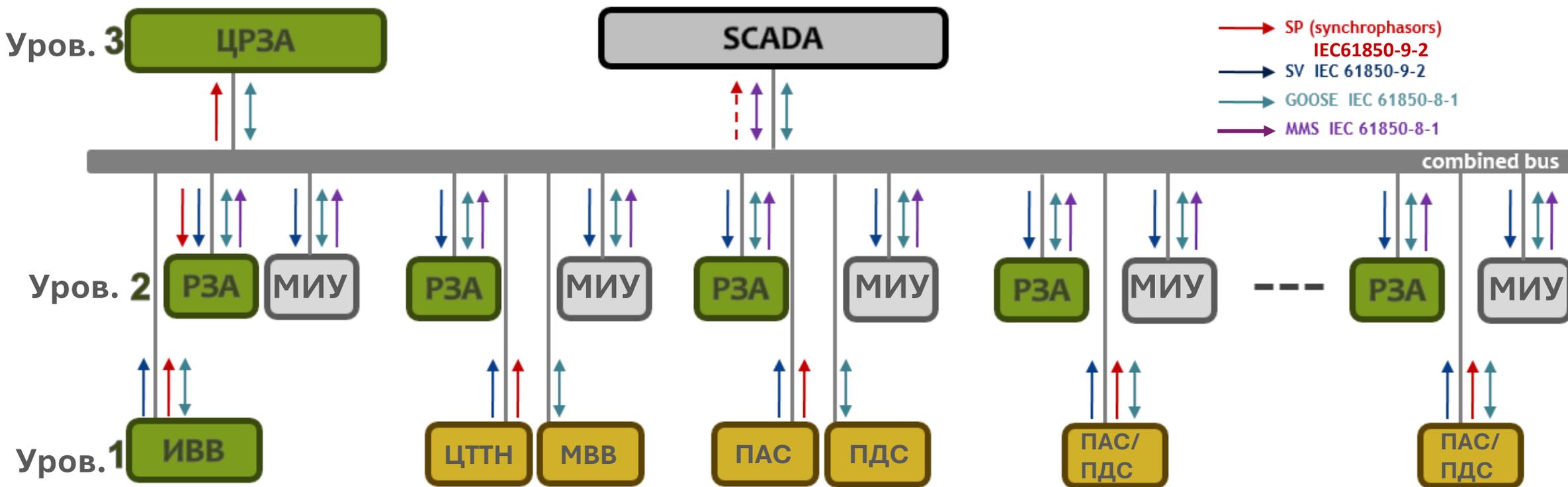
2. Данный сигнал подавался на ЦТТ с функцией СВИ (class S)

3. Измерения от ЦТТ принимались в виде SP-поток (МЭК 61850-9-2) с количеством измерений 8 и 96 на период промышленной частоты в регистратор и на устройство РЗА ENBC.

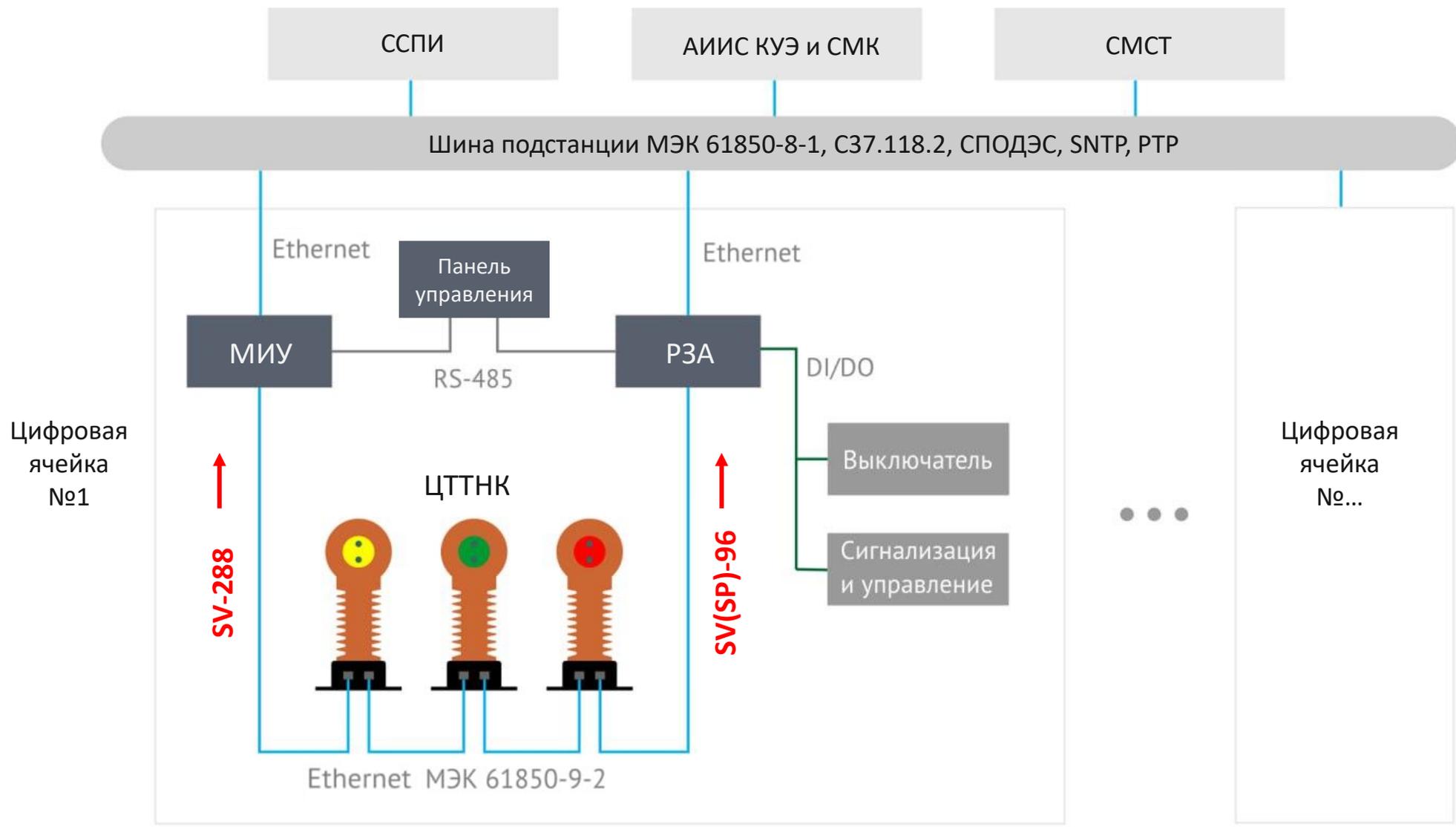
Кратность тока КЗ	Время срабатывания реле, мс		
	оценка	при 96	при 8
1,2 от $I_{sp}$	18	27	30
3 от $I_{sp}$	11	18	19

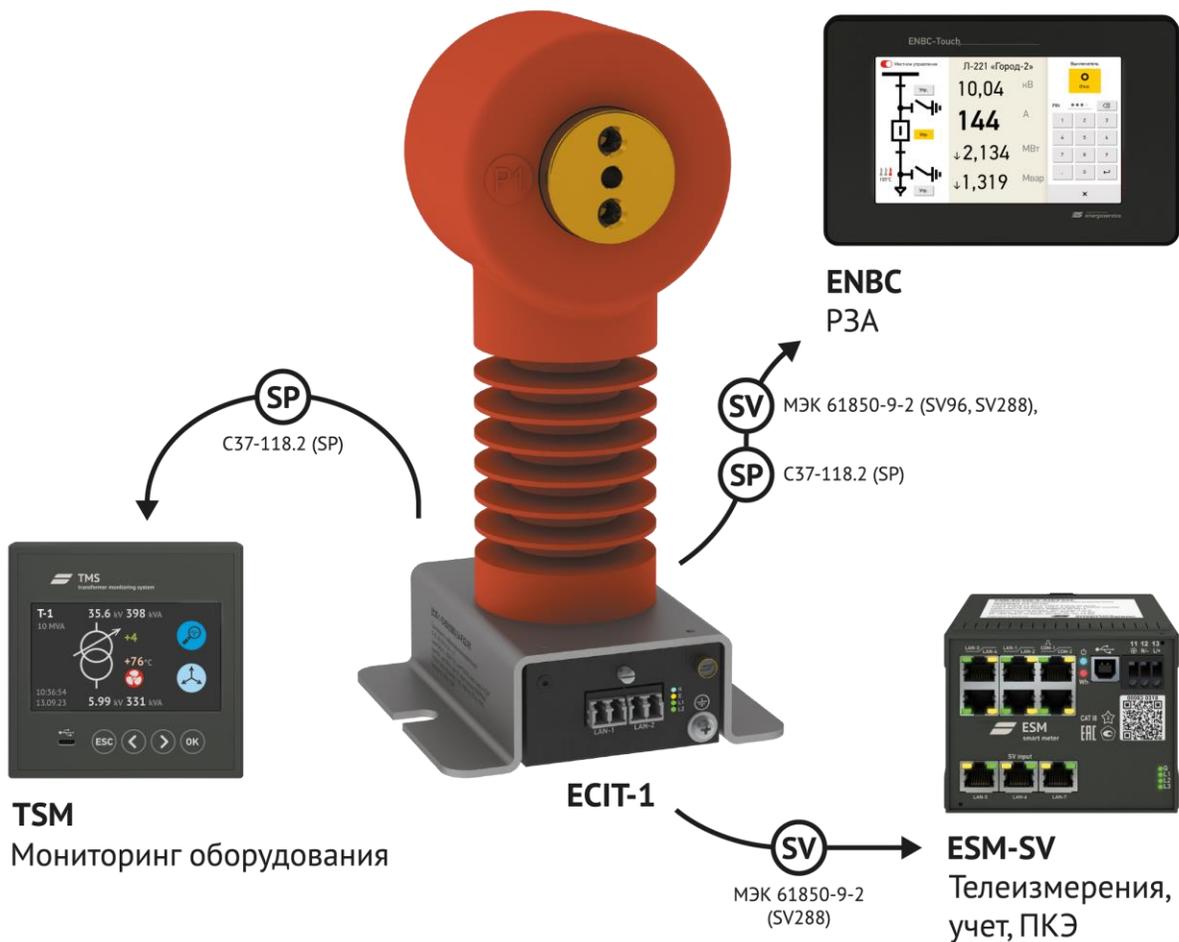
## Формулы расчета эквивалентного синхровектора (class R) с учетом высших гармоник

№	Наименование	Выражение
1	Действующее значение напряжения и тока фазы $a$	$U_a(t) = \sqrt{\int_{t-T_1}^t u_a^2(\tau)g(t-\tau)d\tau}, I_a(t) = \sqrt{\int_{t-T_1}^t i_a^2(\tau)g(t-\tau)d\tau},$ <p>где <math>g(t)</math> импульсная функция фильтра длиной <math>T_1</math>.</p>
2	Эквивалентная комплексная амплитуда напряжения фазы $a$	$\dot{U}_{ea}(t) = \sqrt{2}U_a(t)e^{j\varphi_a(t)},$ <p>где <math>\varphi_a(t)</math> - фазовый угол <math>\dot{U}_a(t)</math>.</p>
3	Активная мощность фазы $a$	$P_{ae}(t) = \int_{t-T_1}^t u_a(\tau)i_a(\tau)g(t-\tau)d\tau.$
4	Реактивная мощность фазы $a$	$Q_{ae}(t) = \int_{t-T_1}^t u_{a\perp}(\tau)i_a(\tau)g(t-\tau)d\tau.$
5	Определение угла между эквивалентными синхровекторами напряжения и тока фазы $a$	$\phi_{ea}(t) = \arg(P_{ea}(t) + jQ_{ea}(t)).$
6	Эквивалентная комплексная амплитуда тока фазы $a$	$\dot{I}_{ea}(t) = \sqrt{2}I_a(t)e^{j(\varphi_a(t)-\phi_{ar}(t))}.$



- совмещенная шина процесса и шина подстанции,
- синхровекторы (SP) преимущественно вместо мгновенных выборочных значений (SV), замещение значительной части MMS-сообщений,
- многоуровневая система защиты и автоматики ПС,
- применение интеллектуальных высоковольтных выключателей (ИВВ).





The screenshot shows the ENBC-Touch control interface for "Л-221 «Город-2»". It includes a schematic diagram on the left, a central data panel, and a status list on the right.

**Local Control:** Местное управление (Red indicator)

**Parameters:**

- $U_{ab}$ : 9.88 кВ
- $I_a$ : 230.1 А
- $I_b$ : 230.1 А
- $I_c$ : 230.1 А

**Status List:**

- Аварийное отключение
- Сработала защита
- Сработала автоматика
- Внешнее отключение
- Неисправность

**Event Log:** Сработала Направленная МТЗ 06:05:04 01.01.70 (1 из 2)

**Buttons:** Упр., Сброс

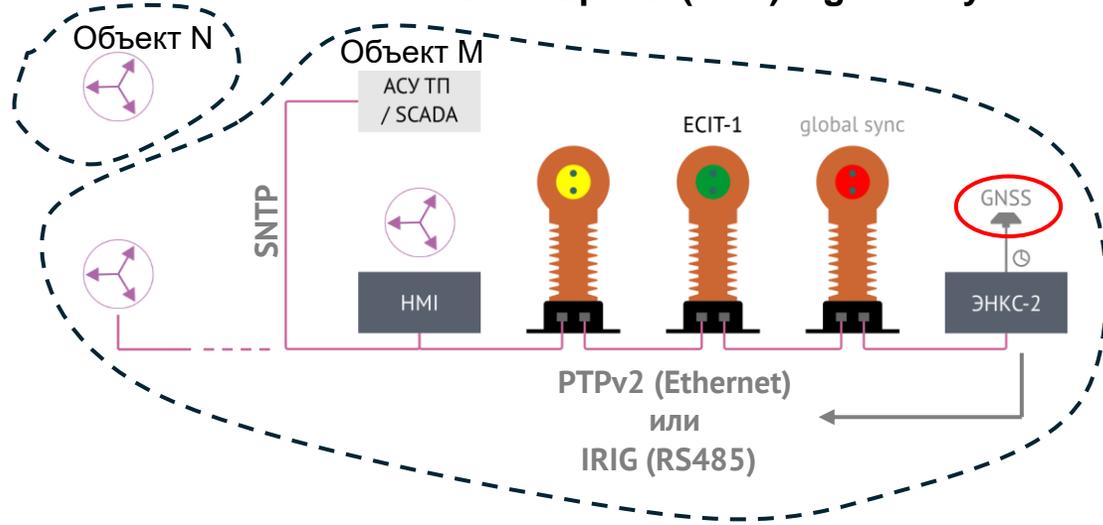
The screenshot shows the ENBC-Touch diagnostic interface for "Диагностика элементов ячейки". It displays a network diagram with status indicators for various components.

**Diagnostic Elements:**

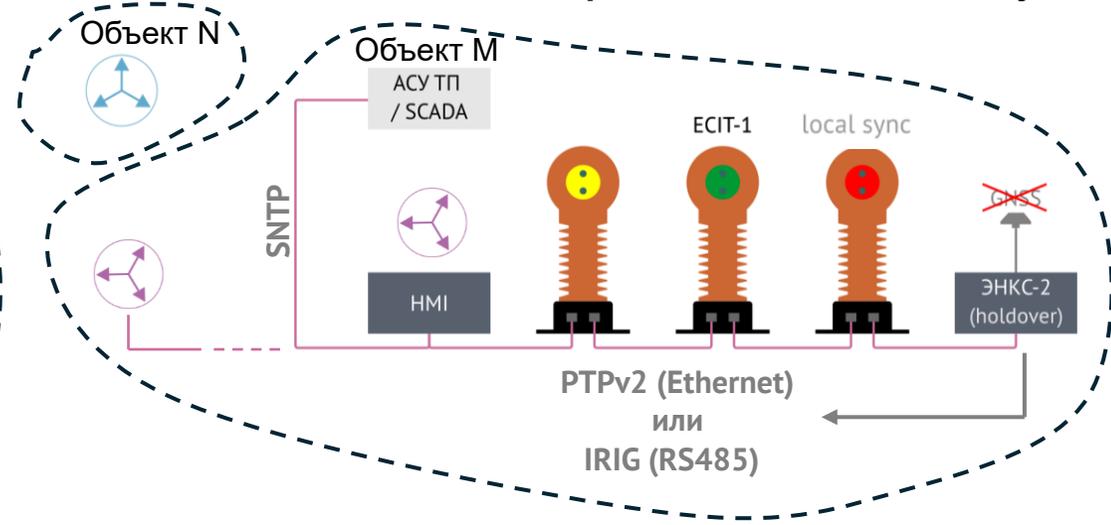
- Touch:** Green checkmark (OK)
- BC:** Green checkmark (OK)
- CS1:** Green checkmark (OK)
- CS2:** Red X (Error)
- ESM:** Green checkmark (OK)
- ET1:** Green checkmark (OK)
- ET2:** Red X (Error)
- ET3:** Green checkmark (OK)
- FR:** Red X (Error)

**Navigation Menu:** Ячейка, Учет и ПКЭ, Диагностика, РЗА

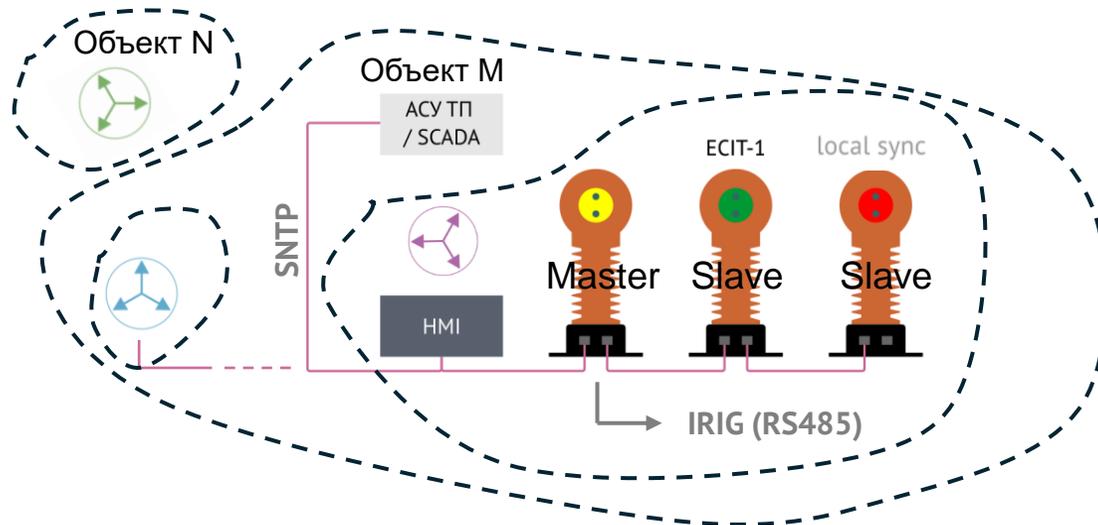
## 1. Глобальное время (UTC) – global sync



## 2. Локальное время объекта – local object sync



## 3. Локальное время присоединения – local node sync



## Электромагнитные ТТ/ТН

Выбор по номинальному току/напряжению

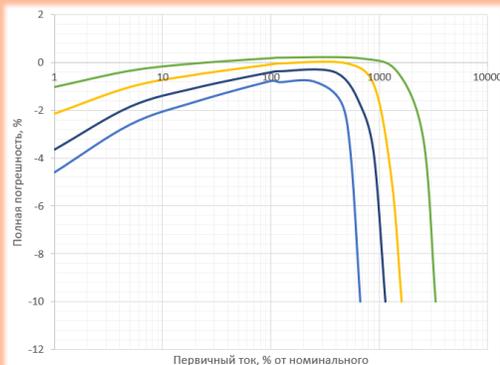
Номинальный ток первичной обмотки, А	50, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2500, 3000, 4000				
Класс напряжения, кВ	3	6	10	15	20
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	3,6	7,2	12	17,5	24
Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	3/√3; 3,3/√3	6/√3; 6,3/√3; 6,6/√3; 6,9/√3	10/√3; 10,5/√3; 11/√3	13,8/√3; 15/√3; 15,75/√3; 3; 16/√3	18/√3; 20/√3; 22/√3

Класс точности Р

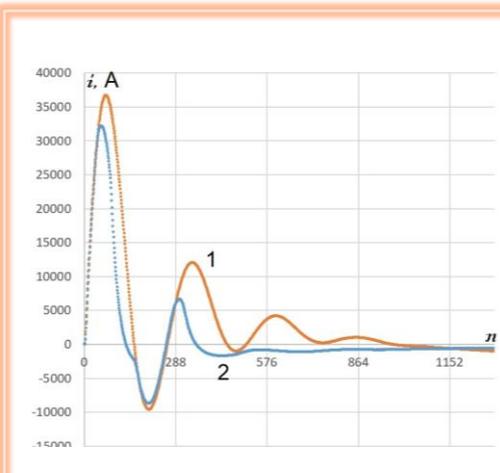
Класс точности ТН	Погрешность ТН при номинальном напряжении	Угловая погрешность
3Р	±3%	±120 мин
6Р	±6%	±240 мин

Класс точности ТТ	Погрешности ТТ при номинальном токе	Угловая погрешность при номинальном токе	Суммарная погрешности при токе предельной кратности
5Р	±1%	±60 мин	5%
10Р	±5%	-	10%

Влияние вторичной нагрузки



Насыщение, остаточная намагниченность



## Цифровой комбинированный ТТ/ТН (ЕСИТ)

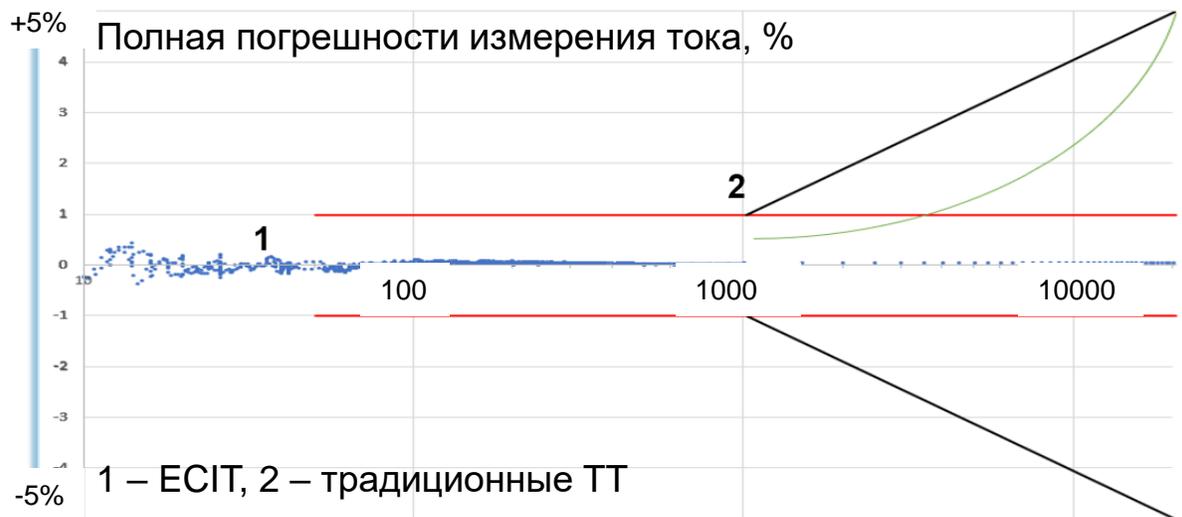
- ✓ комбинированный: ТН + ТТ
- ✓ одно исполнение (до 15 кВ, 50 - 1000 А)
- ✓ отсутствие влияния вторичной нагрузки (цифровой выход)
- ✓ отсутствие эффектов насыщения и остаточной намагниченности
- ✓ более высокие классы точности по току и напряжению для релейных защит и измерений
- ✓ самодиагностика
- ✓ передача до 2-х SV-потоков и потока синхровекторов (SP)
- ✓ встроенные функции РЗА
- ✓ компактность



### Ссылки:

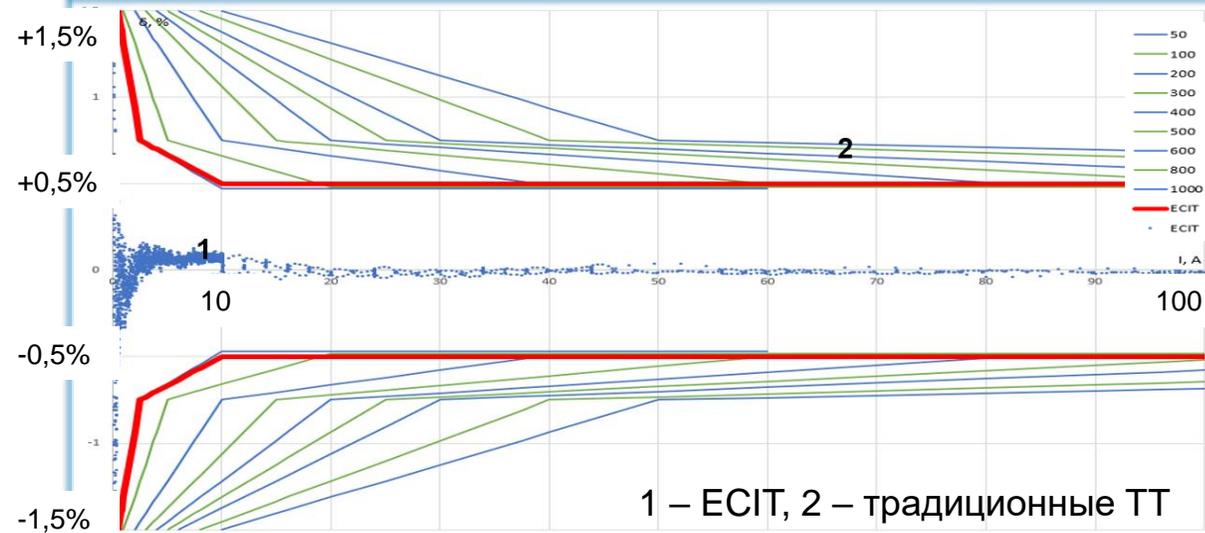
1. Ульянов Д.Н., Плакидин Р.С., Андреев П.И., Мокеев А.В. Трансформатор комбинированный измерительный ЕСИТ, особенности и характеристики встроенного высоковольтного датчика напряжения // Релейщик. – 2023. – № 1(45). – С. 18-19.
2. Ульянов Д.Н., Плакидин Р.С. Цифровой измерительный трансформатор среднего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

## Измерения сверхтоков относительно $I_n=1000$ А



- защиты от коротких замыканий (дифференциальная защита, дистанционная защита)
- определение места повреждения (ОМП)
- мониторинг перегрузочной способности СТ

## Измерения малых токов (< 10 А)



- защита от однофазных замыканий на землю
- системы мониторинга электрооборудования



ЕСИТ-1



ЕСИТ-2



ЕСИТ-3

Тип	ЕСИТ-1	ЕСИТ-2	ЕСИТ-3
Применение	КРУ с воздушной изоляцией	КРУ с воздушной изоляцией	КРУ с газовой изоляцией
Класс напряжения	до 15 кВ	до 15 кВ	до 20 кВ
Наибольший рабочий ток	до 1000 А	до 1600 А (спец. исполнение до 4000 А)	до 630 А
<b>Параметры</b>			
Номинальное первичное напряжение	(3...16)/√3 кВ	(3...16)/√3 кВ	(3...22)/√3 кВ
Наибольшее рабочее напряжение	17.5 кВ	17.5 кВ	24.5 кВ
Кратковременное напряжение (50 Гц)	42 кВ	42 кВ	50 кВ
Нормированное напряжение грозового импульса	75 кВ	75 кВ	125 кВ
Номинальный первичный ток, Iном	50 А	50 А	50 А
Номинальный расширенный первичный ток	1000 А	1600 А	630 А
Номинальный ток термической стойкости	20 кА/1 сек	25 кА/3 сек	25 кА/3 сек
Ток электродинамической стойкости	51 кА	63 кА	63 кА
Класс точности по напряжению	0.5/3P	0.5/3P	0.5/3P
Класс точности по току	0.5S/5PR400	0.5S/5PR500	0.5S/5PR500
<b>Интерфейсы</b>			
Порты	2 × 100Base-TX или 2 × 100Base-FX (LC, MM), RS-485		
Протоколы резервирования	RSTP, IEC 62439-3 PRP		
Протоколы обмена	IEC 61850-9-2 (2 × SMV (14400 (4800) или 12000 (4000) Гц), 1 × SP (50/100/200/400...4800 fps)), IEEE C37.118.2 (1...400 fps), IEC 61850-8-1 GOOSE, IEC 60870-5-104, Modbus TCP, веб-интерфейс		
<b>Синхронизация времени</b>			
	Ethernet: PTPv2 (IEC 61850-9-3), RS-485: IRIG-A или 1PPS		
<b>Питание</b>			
Напряжение питания, потребляемая мощность	18...36 В=, 10 Вт		
<b>Условия эксплуатации и конструкция</b>			
Параметры окружающей среды	-25...+40 °С, RH — до 98 % (+25 °С), 84...106.7 кПа, 1000 м над уровнем моря		
Конструкция	143 × 136 × 270 мм, ≤ 5 кг	224 × 148 × 210 мм, ≤ 15 кг	240 × 100 × 245 мм, ≤ 5 кг

$I_{нб} = (k_{апер} k_{одн} \varepsilon + \Delta U_{рег} + \Delta f_{выр}) I_{вн.мах} + I_{нам}$  - выражение для расчета тока небаланса дифференциальной защиты СТ

$k_{апер}$  - коэффициент апериодической составляющей тока КЗ,  $k_{одн}$  - коэффициент однотипности ТТ,

$\varepsilon$  - предел допускаемой погрешности ТТ,  $\Delta U_{рег}$  - составляющая, учитывающая наличие РПН,

$\Delta f_{выр}$  - составляющая, учитывающая схему соединения ТТ

$I_{вн.мах}$  - максимальный внешний ток КЗ,  $I_{нам}$  - ток намагничивания трансформатора

## Традиционный ТТ



- электромагнитные ТТ с насыщением,
- отсутствует контроль положения РПН,
- традиционный подход к оценке тока небаланса

$$I_{нб} = (2 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 + 0,05) I_{вн.мах} = 0,41 I_{вн.мах}$$

$\geq 41 \%$

## Цифровой ТТ



- осуществляется фильтрация апериодической составляющей,
- цифровые ТТ без насыщения, с передачей потоков синхровекторов,

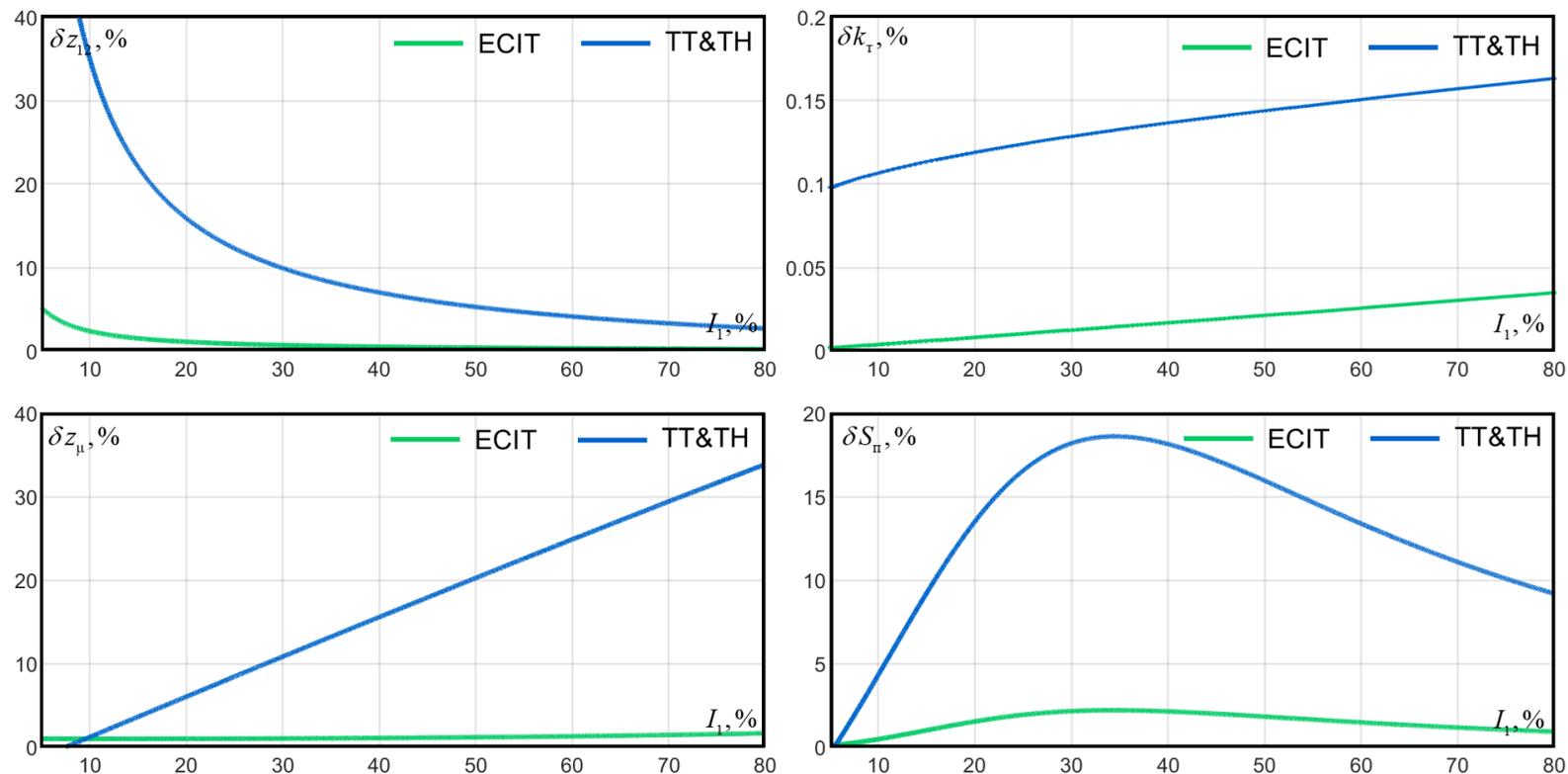
$$I_{нб} = (1 \cdot 0,5 \cdot 0,005 + 0,01) I_{вн.мах} = 0,0125 I_{вн.мах}$$

$\leq 1,25 \%$

## Преимущества:

- отсутствие эффекта насыщения ТТ,
- точные измерения тока и напряжения в широком диапазоне,
- возможность передачи потоков синхровекторов
- снижение объемов передаваемых данных по сравнению с SV потоками
- более высокая точность косвенной оценки параметров электрооборудования
- самодиагностика измерительной системы

## Оценка параметров силового трансформатора



$\delta z_{12}, \%$  - сопротивление обмоток трансформатора,

$\delta z_\mu, \%$  - сопротивление ветви намагничивания (поперечной ветви),

$\delta k_T, \%$  - коэффициент трансформации,

$\delta S_\Pi, \%$  - потери мощности.



**Аналитический модуль** обрабатывает данные, поступающие от УСВИ и др. источников информации на ПС, выявляет аномальные режимы работы СТ и его характеристики с использованием методов статистической обработки данных.

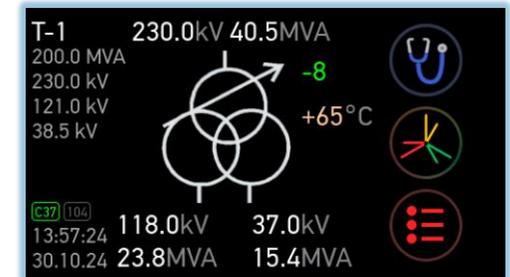
## Функции:

- система сбора и хранения результатов оценки состояния СТ;
- предупредительная и аварийная сигнализация;
- хронологическое протоколирование событий (отчеты);
- интуитивно понятный графический интерфейс;
- средства самодиагностики системы;
- стандартные протоколы обмена среднего и верхнего уровня;
- параметризация и конфигурирование системы без вывода из работы;
- средства тестирования на объекте эксплуатации;
- обеспечение информационной безопасности;
- возможность дополнения системы расчетными и сервисными программами;
- наращиваемость и расширяемость (подключение дополнительных модулей, измерительных датчиков контроля изоляции масла и ВВ).



	A	B	C
U <sub>1</sub>	132.79 kV	132.79 kV	132.79 kV
U <sub>2</sub>	68.10 kV	68.10 kV	68.10 kV
U <sub>3</sub>	21.38 kV	21.38 kV	21.38 kV
I <sub>1</sub>	304.94 A	304.94 A	304.94 A
I <sub>2</sub>	348.85 A	348.85 A	348.85 A
I <sub>3</sub>	721.20 A	721.20 A	721.20 A
S <sub>1</sub>	40.49 MVA	cosφ1	0.93
S <sub>2</sub>	23.76 MVA	cosφ2	0.95
S <sub>3</sub>	15.42 MVA	cosφ3	0.97

	Текущее	Номинальное	Δ, %
U <sub>k</sub> , %	9.31	8.20	+13.5
I <sub>x</sub> , %	3.33	3.30	+0.8
S <sub>d</sub>	107.99 kVA	97.85 kVA	+10.4
K <sub>t</sub>	5.92	5.81	1.9
Z <sub>12</sub>	+3.5	+1.4	13.5
	+13.3i	+12.1i	
Z <sub>0</sub>	+397.5	+402.9	-0.8
	+4439.6i	+4473.6i	



1. Применение технологии СВИ в сочетании с цифровыми ТТ/ТН и многофункциональными ИЭУ дают новые подходы к реализации систем РЗА и автоматизации понизительных подстанций.
2. Многофункциональные устройства РЗА и ИЭУ с поддержкой СВИ позволяют значительно снизить затраты на реализацию подсистем автоматизации подстанции.
3. Система мониторинга СТ на основе СВИ, включающая специализированный аналитический модуль МИСТ, обеспечивает анализ состояния СТ, функции предупредительной и аварийной сигнализации, формирование диагностических отчетов.
4. Цифровые комбинированные измерительные трансформаторы ЕСИТ имеют существенные преимущества по сравнению с электромагнитными ТТ/ТН. Одними из главных преимуществ являются отсутствие эффектов насыщения и остаточной намагниченности, одно исполнение на целый ряд номинальных напряжений и токов, более высокая точность измерений по сравнению с аналогами.

# Научно-практическая конференция

«Релейная защита и автоматизация энергосистем.

Совершенствование эксплуатации и перспективы развития»

**XXVI Международный форум «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ 2024»**



## БЛАГОДАРИМ ЗА ВНИМАНИЕ!



инженерный центр  
**энергосервис**



**Ульянов Дмитрий Николаевич**

заместитель генерального директора

ООО "Инженерный центр "Энергосервис"

аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

Северный (Арктический) федеральный университет

d.ulyanov@ens.ru



Каталог



**КРОКУС ЭКСПО, ПАВИЛЬОН № 2, ЗАЛ № 8, А43**

