

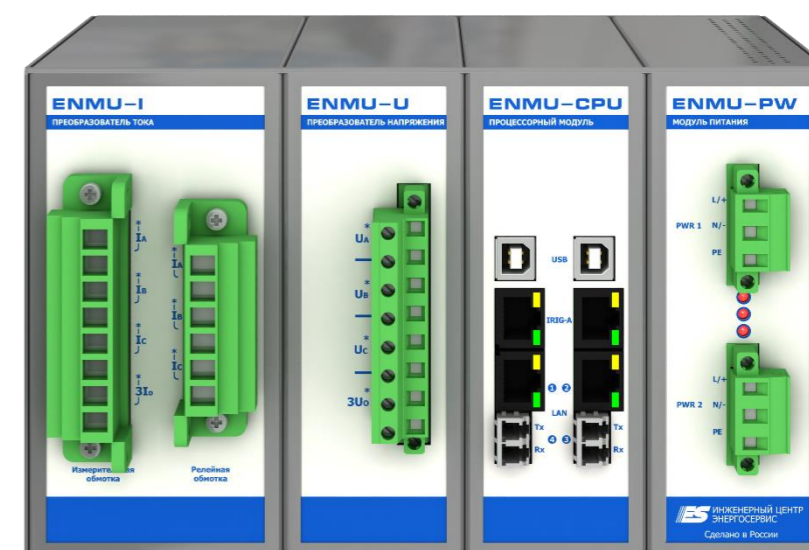
Цифровой комбинированный измерительный трансформатор среднего класса напряжения для задач релейной защиты и управления

Ульянов Д.Н.
ООО «Инженерный центр «Энергосервис»,

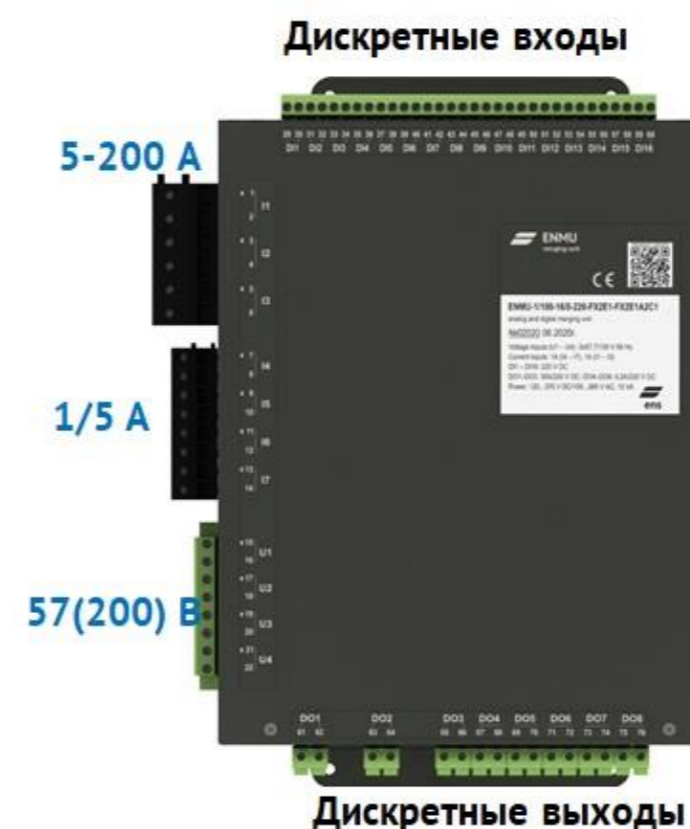
Научно-практической конференции
«Релейная защита и автоматизация энергосистем.
Совершенствование эксплуатации и перспективы развития»
6 сентября 2023 г.

- Развитие цифровых технологий в электроэнергетике уже сегодня приводит к появлению промышленных образцов электротехнического оборудования нового поколения, таких как цифровые измерительные трансформаторы, интеллектуальные высоковольтные выключатели и силовые трансформаторы со встроенными датчиками тока и напряжения. Вышеуказанное оборудование уже сейчас оснащено в той или иной мере встроенными устройствами сопряжения с шиной процесса (**AMU**) и шиной подстанции (**DMU**) для реализации эффективного контроля и управления.

1 ПОКОЛЕНИЕ ENMU (2013)



- С 2013г. ООО «Инженерный центр «Энергосервис» активно ведет разработку и внедрение устройств сопряжения с шиной процесса, как отдельно стоящих (**SAMU**), так встроенных в цифровые измерительные трансформаторы (**AMU**). За последние 10 лет накоплен практический опыт реализации устройств данного класса и выявлены ряд широко проявляющих себя проблем.



IEC 61850-8-1 (MMS, GOOSE)
IEC 60870-5-104, MODBUS, SNMP

SUBSTATION BUS Ethernet LAN

PROCESS BUS Ethernet LAN

IEC 61850-9-2
C37.118.2, FTP

2 x LAN (PRP) + LAN

2 x LAN (PRP) + LAN

2 ПОКОЛЕНИЕ ENMU (2015, 2019)

В части общего применения шины процесса:

- Изначальный принцип разделения сетей на шину процесса и шину подстанции несет в себе существенное удорожание и усложнение коммуникационной среды контролируемого объекта, одновременно со снижением гибкости в обмене информацией между ИУЭ.
- При большом (100 и более) числе на подстанции устройств сопряжения с шиной процесса с ограниченным набором измерительных каналов, к примеру по одной величине (i или u) или по одной фазе, возникает нехватка пропускной способности сети Ethernet 100 Мб/с.
- Для большинства случаев передача 96 выборок мгновенных значений за период промышленной частоты в SV-потоке по шине процесса для решения задач релейной защиты приводит к избыточному трафику и повышению требований к вычислительным возможностям и как следствие удорожанию устройств РЗА.

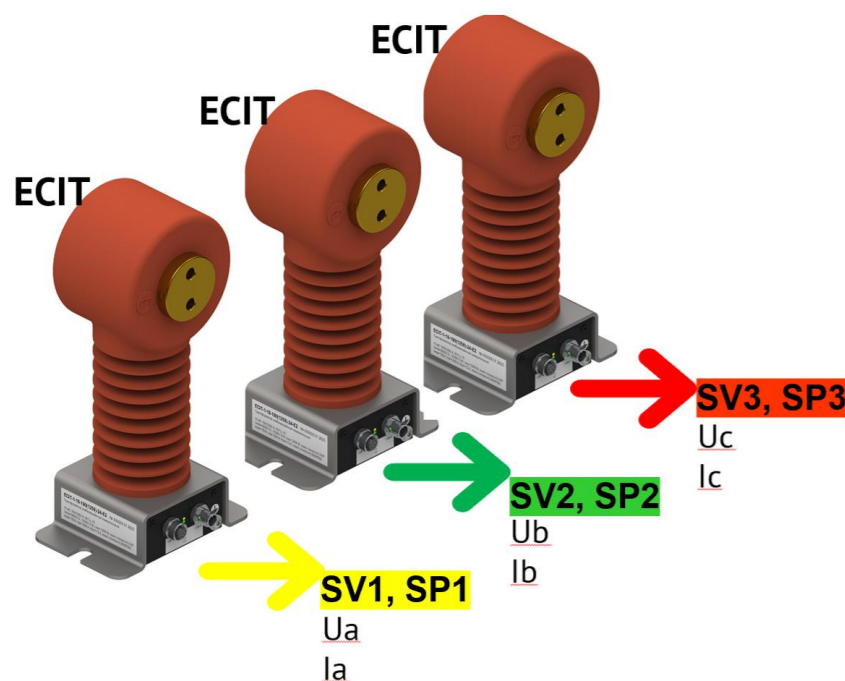
В части применения отдельно стоящих устройств сопряжения с шиной процесса (SAMU):

Широко распространенный подход заключенный в применение отдельно стоящих устройств сопряжения (SAMU) с шиной процесса, подключенных к традиционным электромагнитным трансформаторам тока и напряжения:

- не приводит к уменьшению комплексной метрологической погрешности измерительных каналов;
- не приводит к повышению быстродействия обработки информации;
- снижает помехоустойчивость (ЭМС) и надежность измерительных каналов;
- увеличивает объем и сложность обслуживания измерительных каналов.

- При использовании ИЭУ и SAMU (AMU) от разных производителей необходима гибкая настройка и поддержка реализации стандартов формирования и обработки SV-потоков: IEC 61850-9-2LE, IEC 61869-9, корпоративных профилей электроэнергетических компаний.
- Для повышения совместимости в шине процесса на уровне сетевого оборудования и подключаемых устройств необходимо поддержка обоих РТР профилей для IEEE C37.118 и IEC 61850-9-3.
- Для повышения надежности функционирования шины процесса с применением оборудования от различных производителей необходимо внести дополнительные требования к функционалу всех подключаемых к шине процесса устройств: прием не менее трех SV-потоков, их переключение по заданным условиям и диагностика в ИЭУ, запись осциллограмм и журналирование РТР, подписка и публикация GOOSE-сообщений, наличие собственных дискретных входов/выходов в AMU/SAMU.

1. Повышение **многофункциональности АМУ** в части вычислений и передачи синхронизированных векторных измерений по шине процесса в рамках требований к формату кадров Ethernet стандартов IEC 61850-9-2LE, IEC 61869-9 с количеством измерений 10, 20, 40, 80 и 96 раз за период промышленной частоты. С последующим приемом СВИ устройствами РЗА **для обработки уже вычисленных комплексных амплитуд и фазового угла в замен SV-потока.**
2. Широкое внедрение **цифровых комбинированных измерительных трансформаторов** со встроенным АМУ и передачей по шине процесса не только мгновенных значений с частотой выборки до 14400 Гц, но и синхронизированных векторных измерений.



3 ПОКОЛЕНИЕ ENMU (2021)

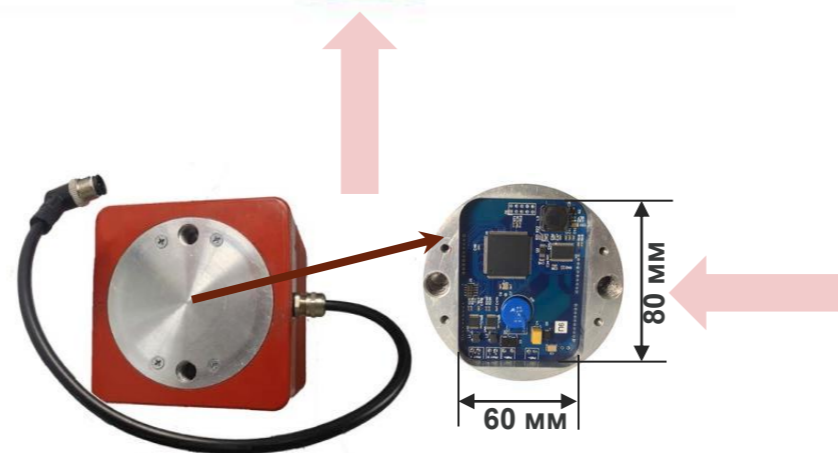
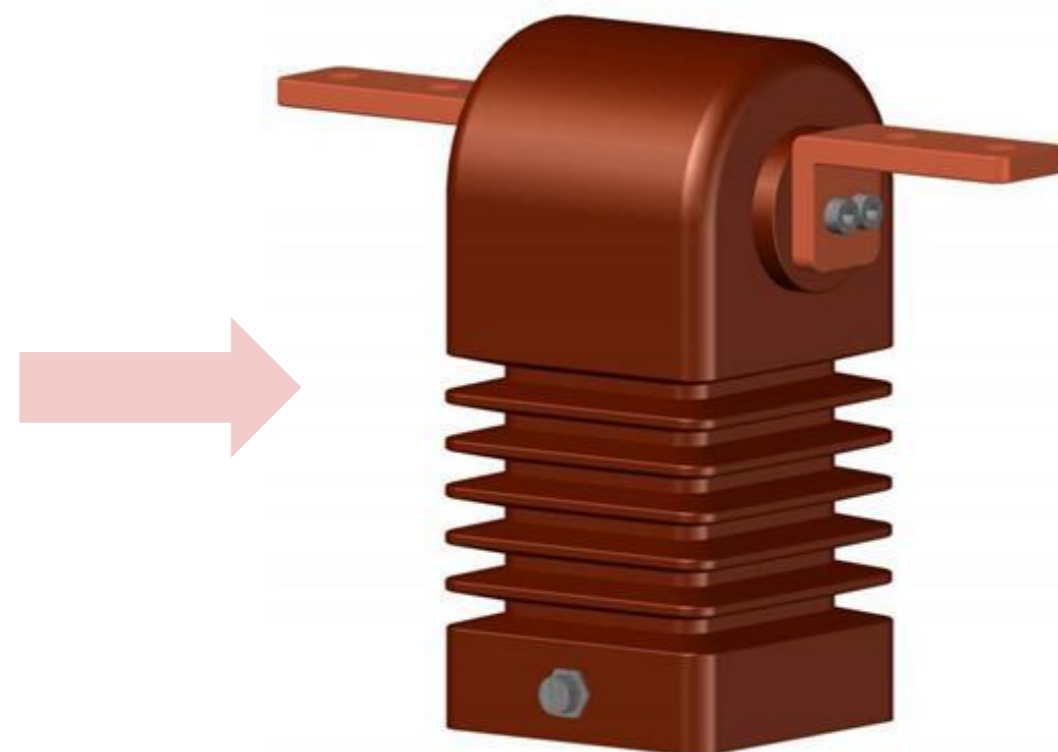
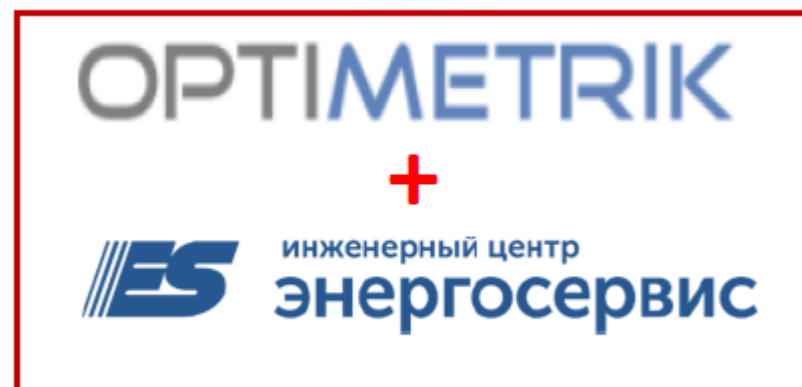


Совмещенная шина процесса и шина подстанции

**2 x SFP, 1G/100Mb, PRP/HSR, RTP
2 x 100 Mb**

Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU является **многофункциональным устройством** и дополнительно выполняет функции РМУ (измерение синхрофазоров тока и напряжения), концентратора векторных данных (PDC), регистратора аварийных режимов, измерительного преобразователя телемеханики.

Цифровой комбинированный датчик тока и напряжения 10 кВ ТЕСV.P1-10



Поддержка МЭК 61850-9-2LE, 1(2)
порта Ethernet.

Поддержка низкоуровневой шины
процесса на базе сети FlexRay
(2 резервируемых канала).

Модификации ТЕСV.P1-10:

- с цифровым выходом передачи измерений.

Измерение тока:

- трансформатор тока маломощный LPCT,
- катушка Роговского.

Измерение напряжения:

- емкостной делитель напряжения.

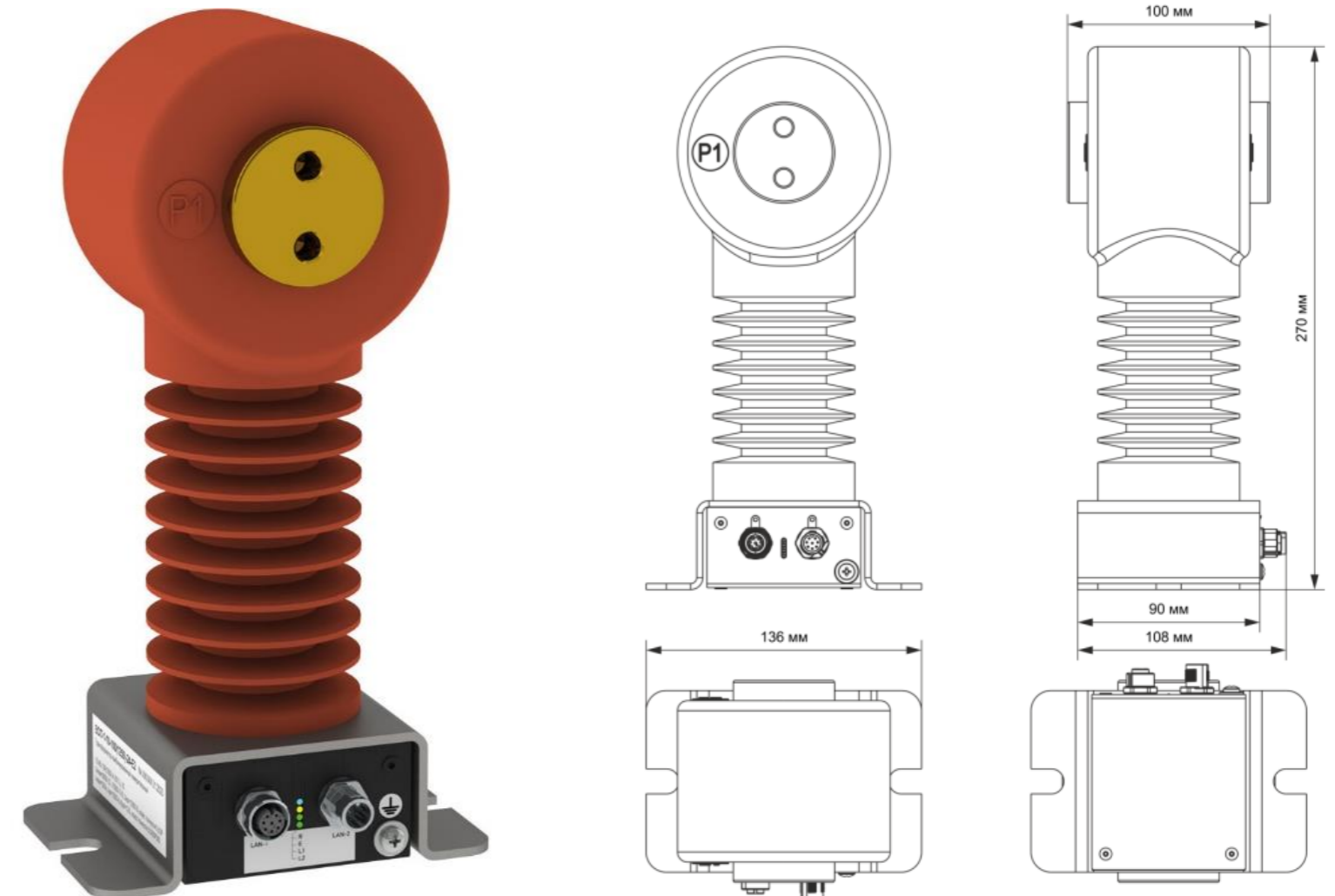
Цифровой КДТН ТЕСV.P1-10 со
встроенным
преобразователем
аналоговых сигналов (АМУ)
на базе серийного ENMU

Первый в мире цифровой ЦКДТН среднего напряжения
2017 г.

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Номинальная частота f , Гц	50
2.	Класс напряжения, кВ	10
3.	Наибольшее рабочее напряжение $U_{нр}$, кВ	12
4.	Испытательное напряжение 50 Гц, 1 мин, кВ	28
5.	Наибольший рабочий ток $I_{нр}$, А	1250
6.	Ток трехсекундной термической стойкости I_{th} , кА	20
7.	Ток электродинамической стойкости I_{dyn} , кА	51
8.	Количество измеряемых фаз	1
9.	Значение частоты дискретизации ¹⁾ , Гц	4000; 4800; 12000; 12800; 14400

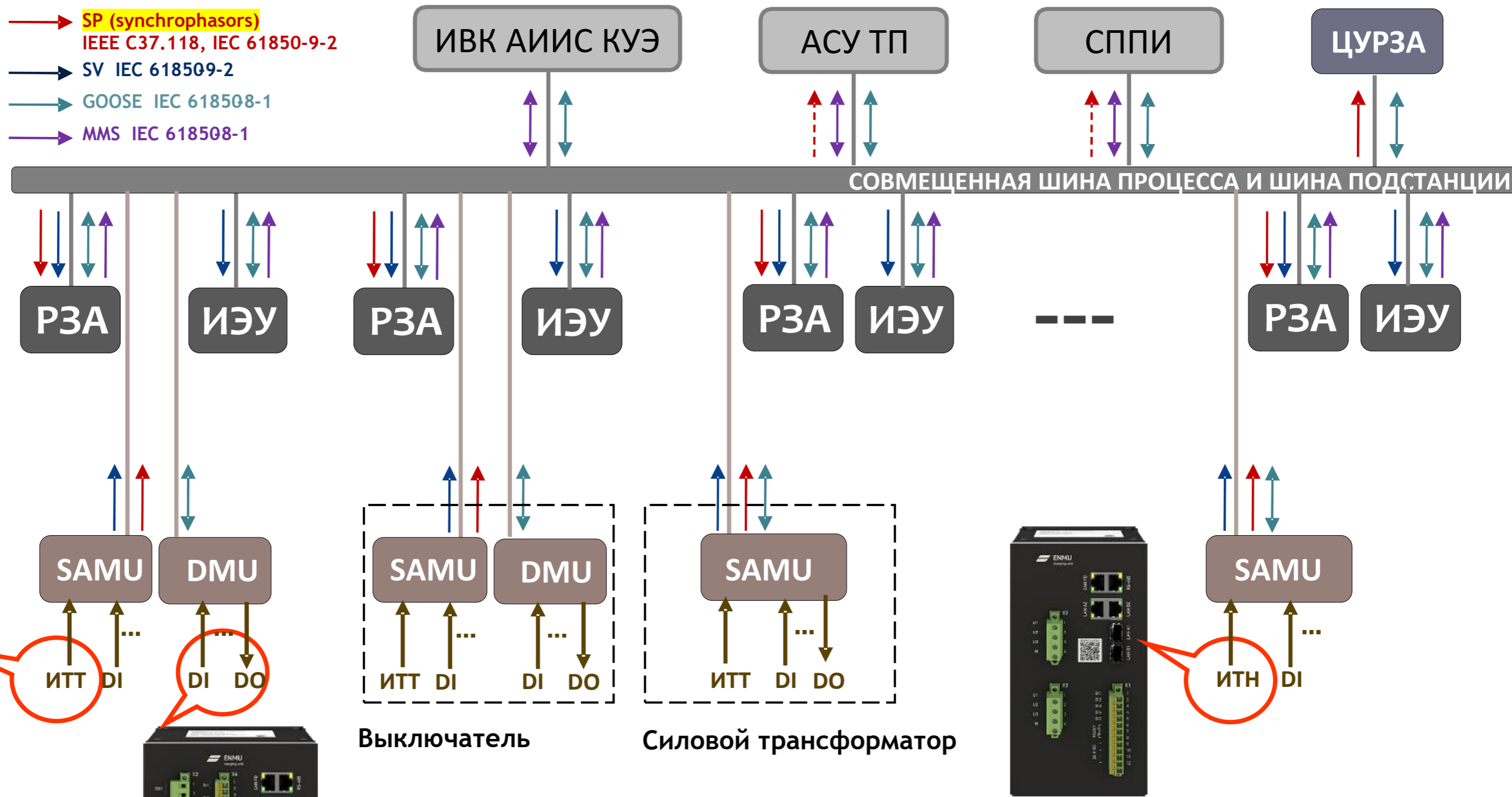
№	Наименование характеристики	Значение
10.	Номинальный коэффициент превышения первичного тока $K_{пр}$	12,5
11.	Класс точности по току для измерений согласно ГОСТ 7746 (ГОСТ Р МЭК 60044-8)	0,5S
12.	Пределы допускаемой основной относительной погрешности преобразований среднеквадратического значения ¹⁾ силы переменного тока для измерений, %	$\pm 0,75$ при $0,01 \cdot I_n \leq I < 0,05 \cdot I_n$ $\pm 0,5$ при $0,5 \cdot I_n \leq I \leq 12,5 \cdot I_n$
13.	Пределы допускаемой абсолютной погрешности преобразований угла фазового сдвига между входной и выходной силами переменного тока для измерений, минут	± 45 при $0,01 \cdot I_n \leq I < 0,05 \cdot I_n$ ± 30 при $0,5 \cdot I_n \leq I \leq 12,5 \cdot I_n$

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Номинальное напряжение переменного тока U_n , В	$11000/\sqrt{3}$
2.	Класс точности по напряжению для измерений в диапазоне от $0,2 \cdot U_n$ до $1,2 \cdot U_n$ согласно ГОСТ 1983 (ГОСТ Р МЭК 60044-7)	0,5
3.	Предел допускаемой основной относительной погрешности преобразований среднеквадратического значения ¹⁾ напряжения переменного тока для измерений, %	$\pm 0,5$ при $0,2 \cdot U_n \leq U \leq 1,2 \cdot U_n$
4.	Предел допускаемой абсолютной погрешности преобразований угла фазового сдвига между входным и выходным напряжениями переменного тока для измерений, минут	± 20 при $0,2 \cdot U_n \leq U \leq 1,2 \cdot U_n$
5.	Номинальный коэффициент перенапряжения F_v	1,9/8
6.	Класс точности по напряжению для защиты в диапазоне от $0,005 \cdot U_n$ до $1,9 \cdot U_n$ согласно ГОСТ 1983 (ГОСТ Р МЭК 60044-7)	3P
7.	Предел допускаемой основной относительной погрешности преобразований среднеквадратического значения ¹⁾ напряжения переменного тока для защиты, %	± 3 при $0,005 \cdot U_n \leq U \leq 1,9 \cdot U_n$
8.	Предел допускаемой абсолютной погрешности преобразований угла фазового сдвига между входным и выходным напряжениями переменного тока для защиты, минут	± 120 при $0,005 \cdot U_n \leq U \leq 1,9 \cdot U_n$
9.	Номинальный первичный ток I_n , А	100



ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЦПС И СВИ

- SP (synchrophasors) IEEE C37.118, IEC 61850-9-2
- SV IEC 61850-9-2
- GOOSE IEC 61850-8-1
- MMS IEC 61850-1



Выключатель

Силовой трансформатор

ENMU, обновление 2021

Совмещенная шина процесса и шина подстанции

2 x SFP, 1G/100Mb, PRP/HSR, RTP

2 x 100 Mb, **передача СВИ (SP-поток)**

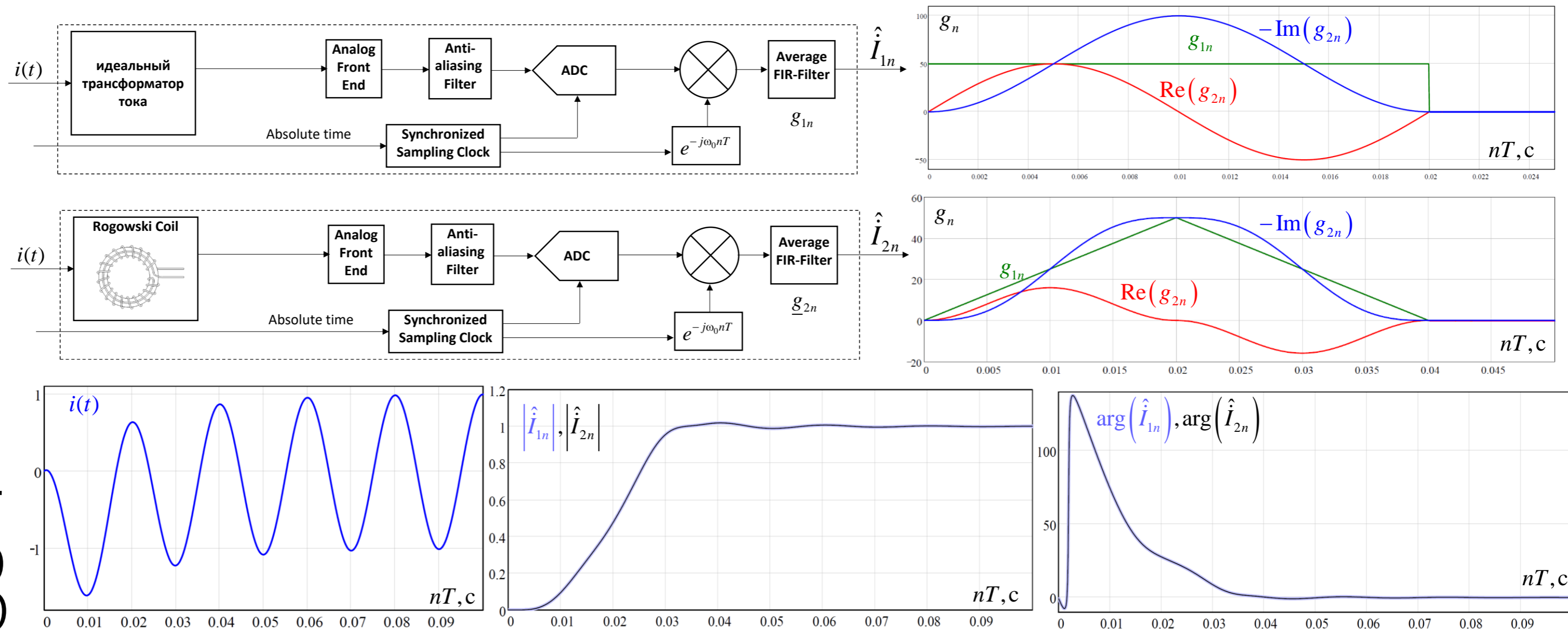
ЦИФРОВОЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ЕСІТ

- В ЕСІТ производится цифровая обработка сигналов для восстановления первичного тока от катушки Роговского с последующим формированием SV-поточков и дополнительная обработка сигналов для формирования синхровекторов тока.
- Разработан метод синтеза цифровых фильтров для формирования синхровекторов с учетом особенностей катушки Роговского. При этом вместо усредняющего КИХ-фильтра, предложено использовать КИХ-фильтр с комплексной импульсной функцией. Математическое моделирование такого подхода показало высокое быстродействие и точность при вычислении комплексной амплитуды и фазового угла первой гармоники в переходном режиме с учетом апериодической составляющей.

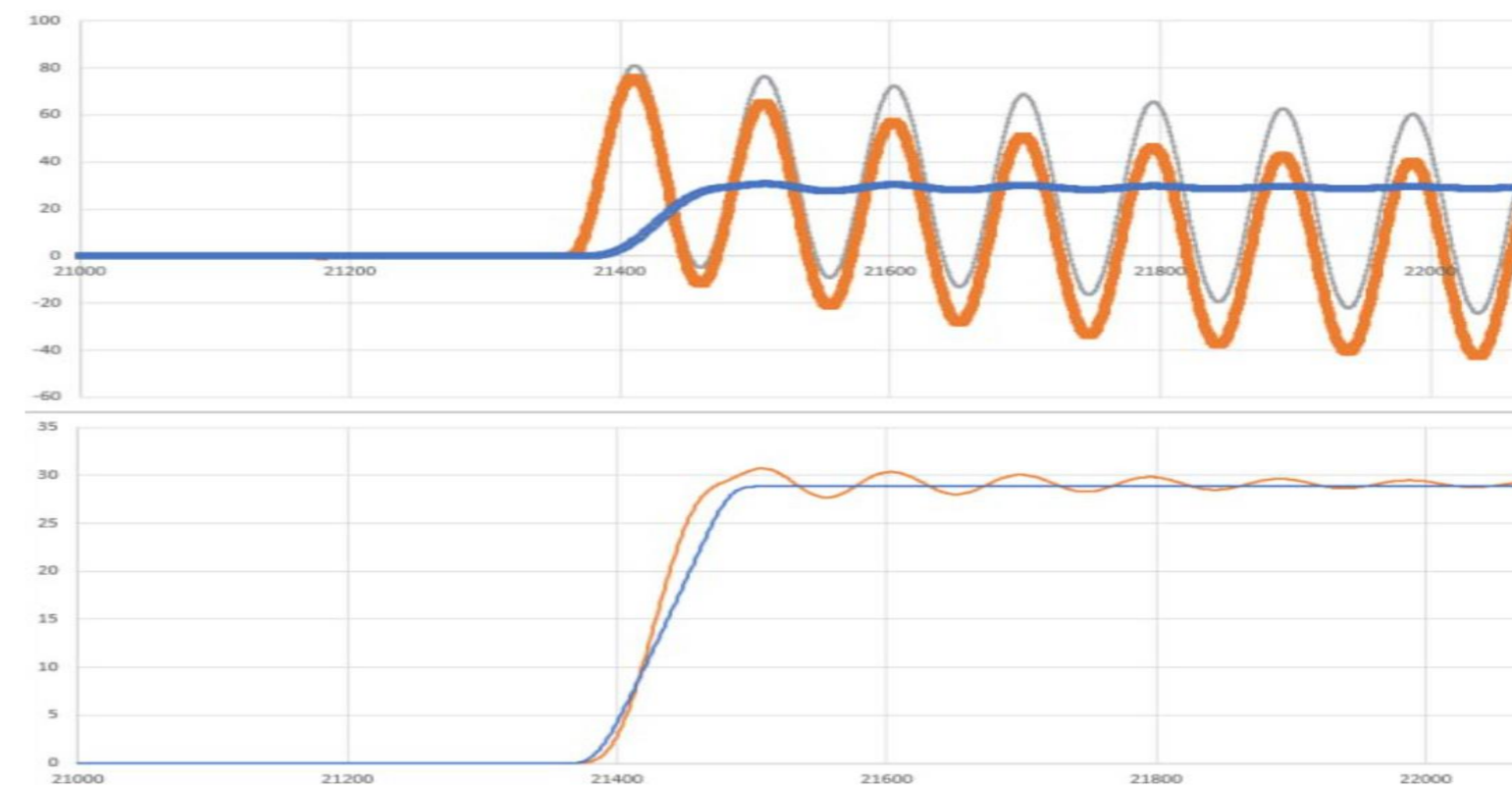
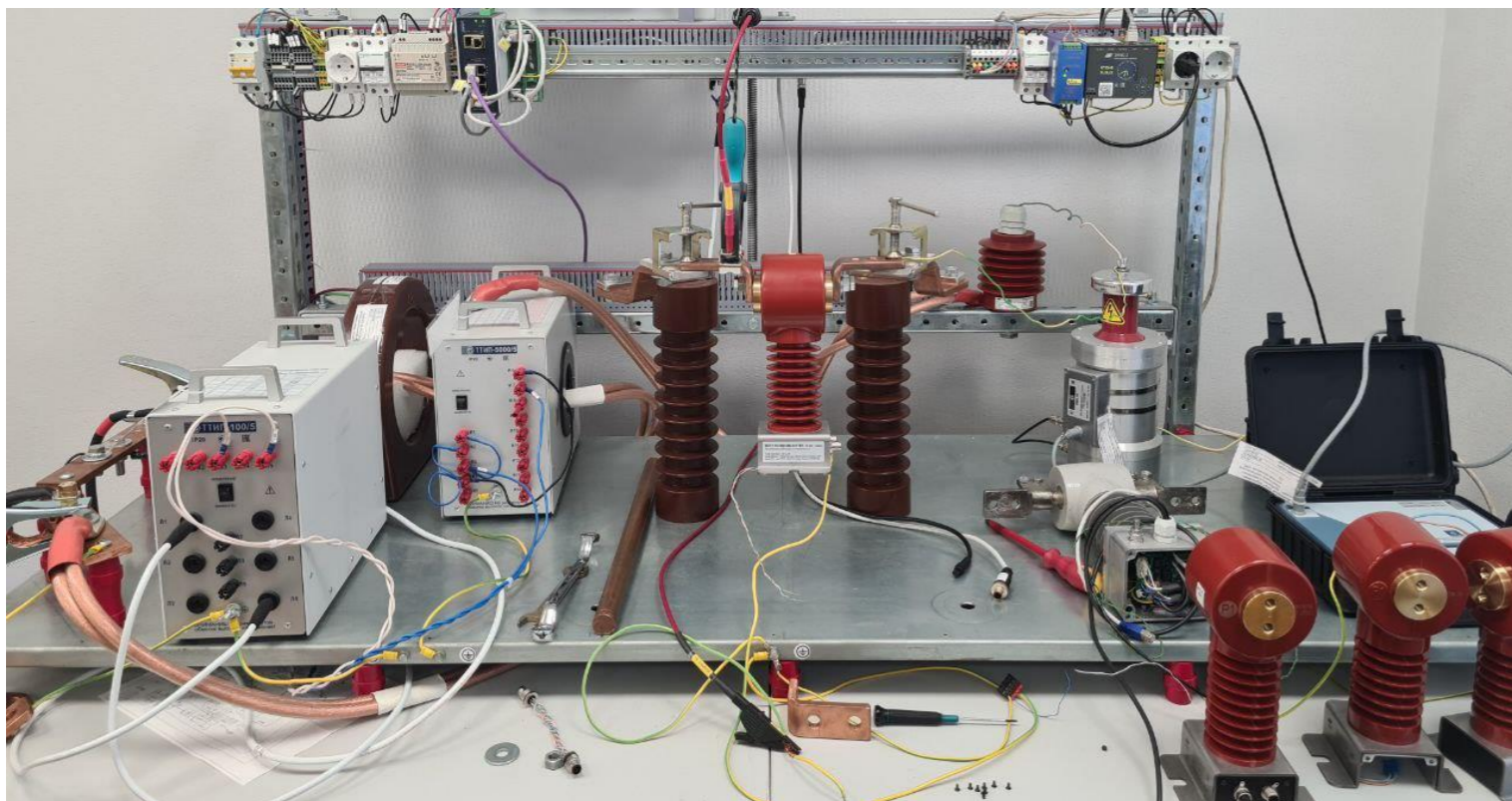


ЕСІТ

1-1250 А (0,5S/5P)
0,4-12 кВ (0,5/3P)



- С помощью лабораторного источника тока OMICROM CMC256plus через усилитель 400А были воспроизведены сигналы тока, соответствующие различным электромагнитным и электромеханическим переходным режимам энергосистемы с отклонением частоты до ± 5 Гц. Измерения сгенерированных таким образом сигналов собиралась от ЕСИТ в виде SV-потока, в виде данных СВИ согласно IEEE С37.118, а также в виде SP-потока СВИ (10 и 96 синхровекторов за период промышленной частоты) на базе разработанного алгоритма.
- Сделан промежуточный вывод об ограниченной возможности применения СВИ класса Р и М согласно IEEE С37.118 для задач релейной защиты и управления на подстанциях с цифровой шиной процесса в отличие от предложенного SP-потока с подтвержденным быстродействием определения комплексной амплитуды в 11-28 мс (в разных режимах).



По результатам проведенных исследований доказано:

- преимущество использования цифровых измерительных трансформаторов со встроенным АМУ по сравнению с отдельно стоящими SAMU. Такой подход дает улучшение метрологических характеристик измерений, повышение помехоустойчивости, возможность мониторинга состояния оборудования и наличие цифровых коммуникаций.
- предложенный цифровой фильтр комплексной импульсной функцией позволяет вычислять синхронизированные векторные измерения в составе цифрового трансформатора тока и использовать их для различного функционального назначения, в том числе для устройств релейной защиты и автоматики, и для многофункциональных измерительных ИЭУ.
- цифровые трансформаторы тока на базе катушки Роговского с выдачей SV- и SP- потока не уступают по точности электромагнитным измерительным трансформаторам тока в стационарных режимах, но при этом превосходят их по диапазонам измерений тока и точности в переходных режимах работы энергосистем.
- проблему повышенной загрузки сети передачи данных цифровой шины процессов, а также проблему высоких требований к вычислительным возможностям устройств РЗА поможет решить вычисление СВИ и передача SP-потока на базе цифровых комбинированных трансформаторов тока и напряжения с настраиваемой частотой измерений от 10 до 96 раз за период.

Благодарим за внимание!

Приглашаем посетить наш стенд в
55 павильоне ВДНХ, **C02**



Ульянов Дмитрий Николаевич
Зам. генерального директора ООО
«Инженерный центр «Энергосервис»

d.ulyanov@ens.ru