

Сочи, 30 мая – 01 июня

Международная научно-техническая конференция

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ – 2023**

 инженерный центр
энергосервис



**ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ЦИФРОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА
НА ОСНОВЕ КАТУШКИ РОГОВСКОГО ДЛЯ ЦПС**

Плакидин Роман Сергеевич

Р.С. Плакидин¹, Д.Н. Ульянов¹, Е.И. Хромцов¹, П.И. Андреев^{1,2}, А.В. Мокеев^{1,3}

¹ ООО «Инженерный центр «Энергосервис»

² Санкт-Петербургский политехнический университет

³ Северный (Арктический) федеральный университет

Россия



Нормативное обеспечение ЦПС

номер	название стандарта	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
61850-9-2	Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3	1							2									2.1
DigIF_spec_9-2LE	The Implementation guideline for digital interface to instrument transformers using IEC 61850-9-2	1																
МИ 3476-2015	Руководство по реализации цифрового интерфейса в измерительных трансформаторах. Применение МЭК 61850-9-2												1					
61869-9	Instrument transformers - Part 9: Digital interface for instrument transformers													1				

IEC 61869 Instrument transformers:

IEC 61869-1:2007 **General requirements**

ГОСТ IEC 61869-1-2015

IEC 61869-2:2012 Additional requirements for **current transformers**

ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015

IEC 61869-3:2011 Additional requirements for **inductive voltage transformers**

ГОСТ IEC 61869-3-2012

IEC 61869-4:2013 Additional requirements for **combined transformers**

ГОСТ Р МЭК 61869-4-2019

IEC 61869-5:2011 Additional requirements for **capacitor voltage transformers**

ГОСТ Р МЭК 61869-5-2019

IEC 61869-6:2016 Additional general requirements for **low-power instrument transformers**

ГОСТ Р МЭК 61869-6-2021

IEC 61869-9:2016 **Digital interface** for instrument transformers

-

IEC 61869-10:2017 Additional requirements for **low-power passive current transformers**

ГОСТ Р 59408-2021

IEC 61869-11:2017 Additional requirements for **low power passive voltage transformers**

ГОСТ Р 59409-2021

IEC 61869-13:2021 **Stand-alone merging unit (SAMU)**

-

IEC 61869-14:2018 Additional requirements for **current transformers for DC** applications

-

IEC 61869-15:2018 Additional requirements for **voltage transformers for DC** applications

-

IEC 61869-99:2022 Glossary

-

СТО 29.240.10.299-2020 Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС

СТО 29.240.10.272-2019 Аналого-цифровые устройства сопряжения. Методы испытаний

СТО 25.040.30.309-2020 Корпоративный профиль МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС»



Вступление

Преимущества цифровых измерительных трансформаторов с активной электронной частью по сравнению с традиционными ТТ и ТН:

- лучшие метрологические характеристики,
- повышенная помехоустойчивость,
- возможность мониторинга состояния,
- хранение данных о характеристиках и калибровочных коэффициентах,
- меньшие массогабаритные показатели.

Разработка ЦКДТН имеет важное значение для развития систем автоматизации подстанции.





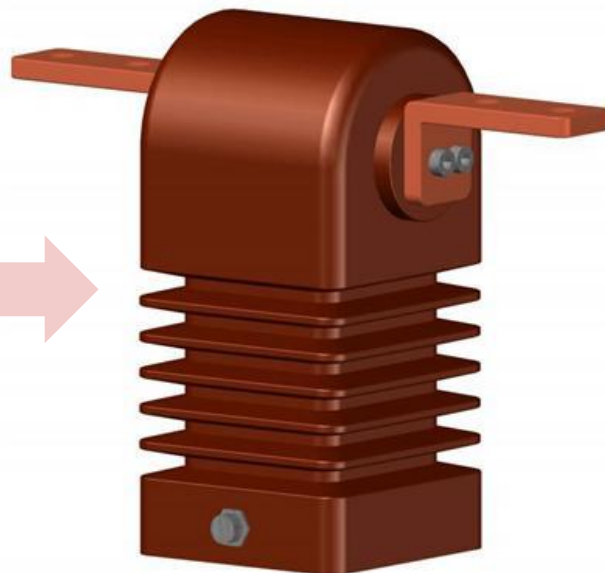
Опыт применения датчиков тока и напряжения

Цифровой комбинированный датчик тока и напряжения 10 кВ ТЕСV.Р1-10

ОПТИМЕТРИК



инженерный центр
энергосервис



Модификации ТЕСV.Р1-10:

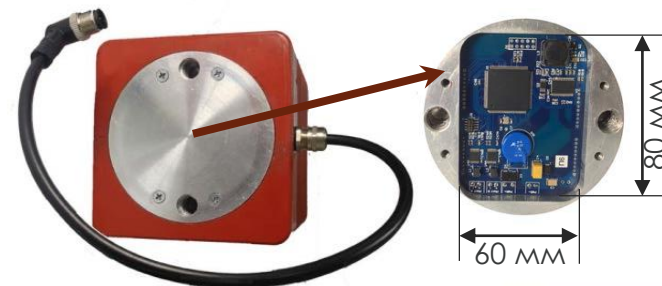
- с цифровым выходом передачи измерений.

Измерение тока:

- трансформатор тока маломощный LPCT,
- катушка Роговского.

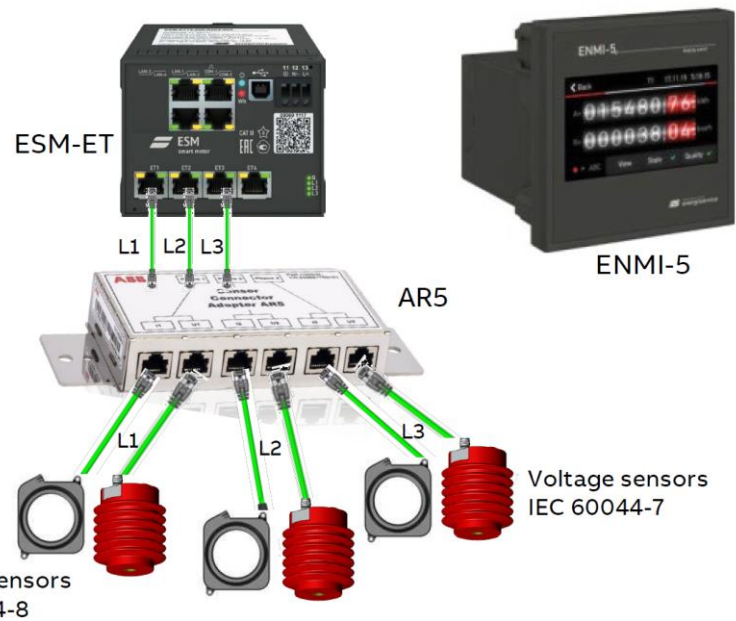
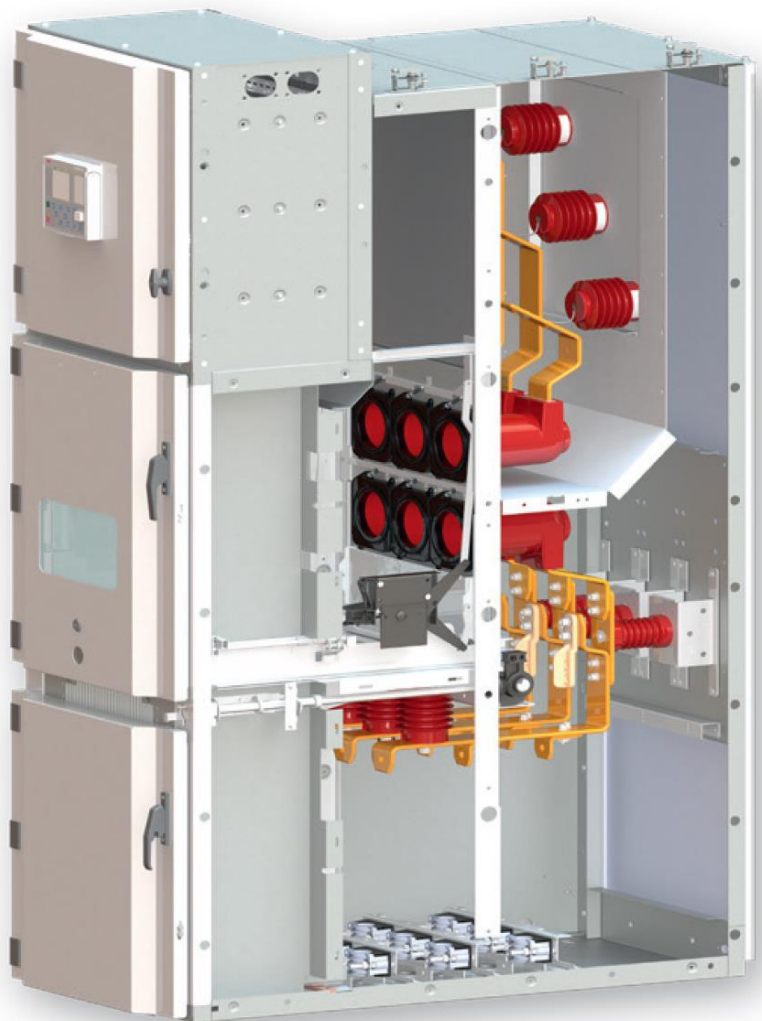
Измерение напряжения:

- емкостной делитель напряжения.





Взаимная работа LPCT и ESM-ET



KEVA 36 B2x
KEVA 38 B2x
KEVA 48 B2x

RIO 600

615 / 620 SERIES

640 SERIES

ESM-ET



Offset factor:

0.99870

0.99542

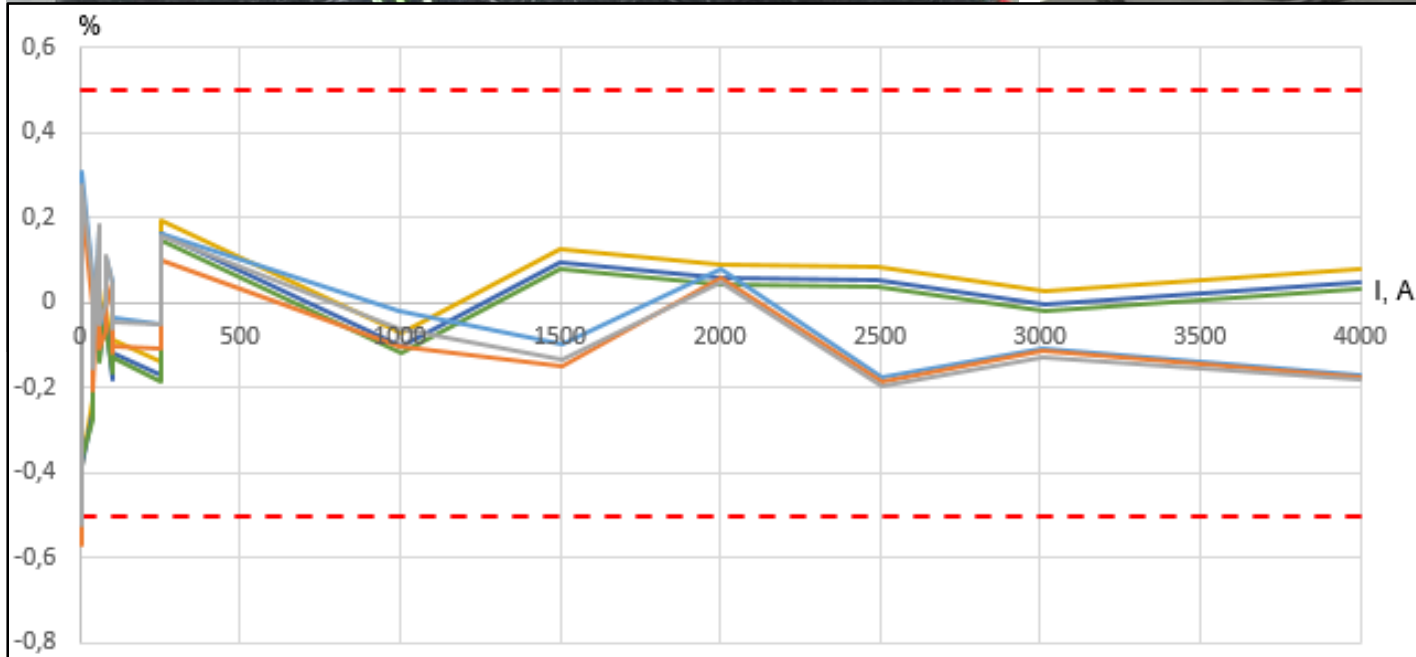
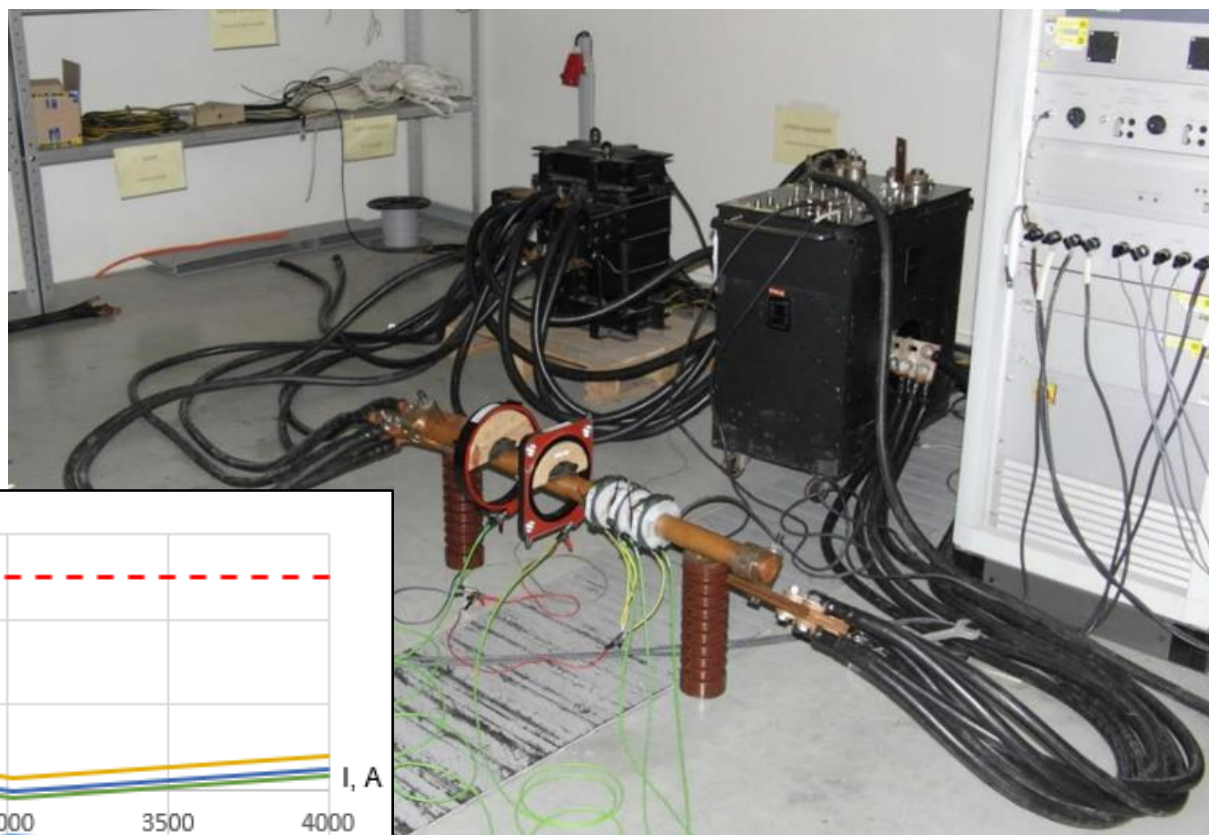
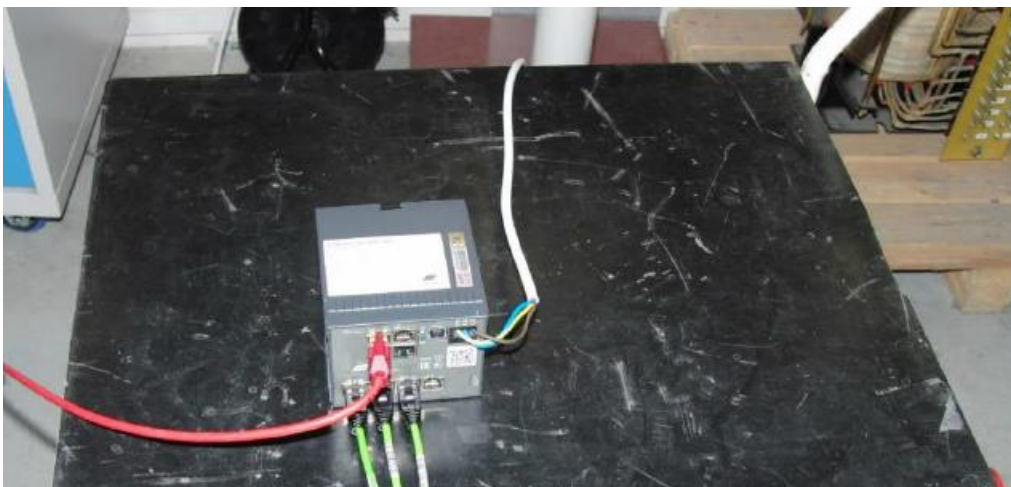
0.98961

0.98892

Tab. 1: Offset factors for selected compatible IEDs

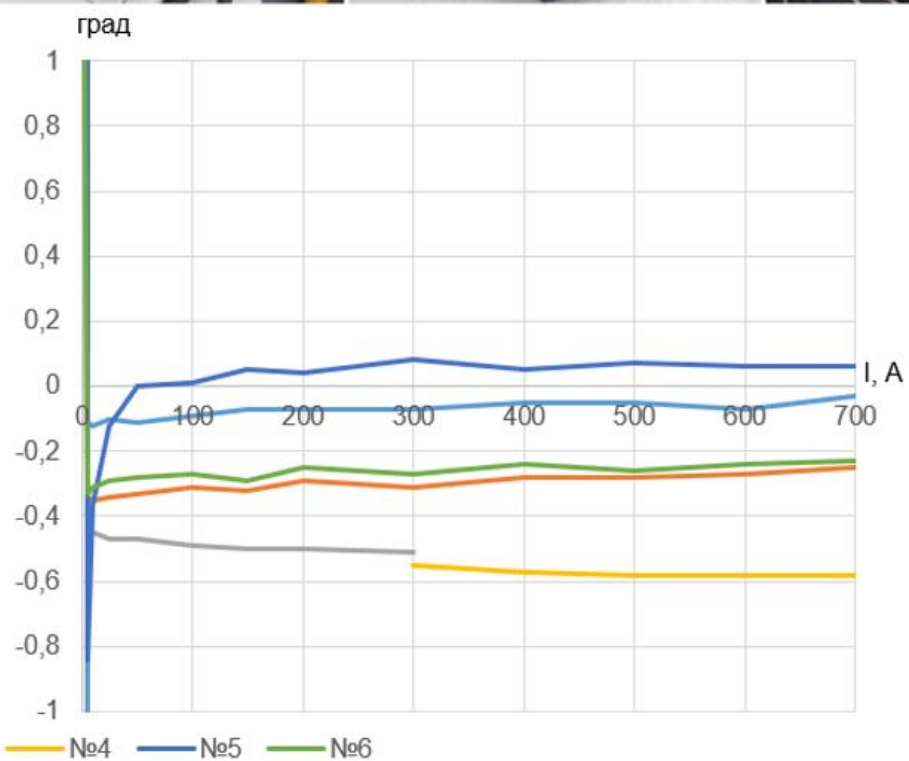
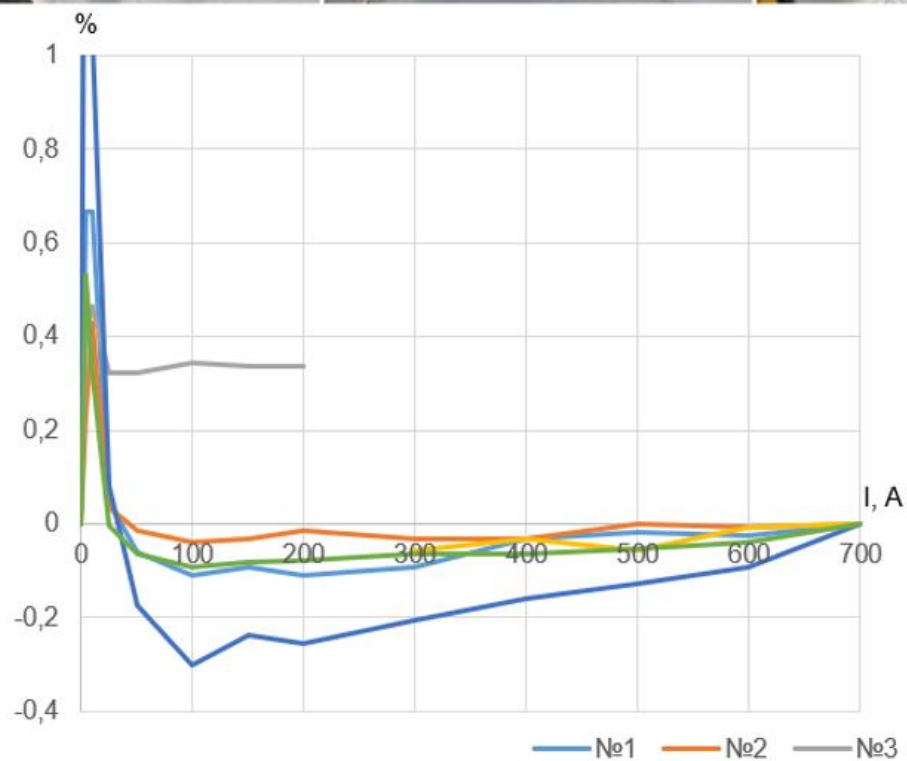


Взаимная работа ЛРСТ и ESM-ET



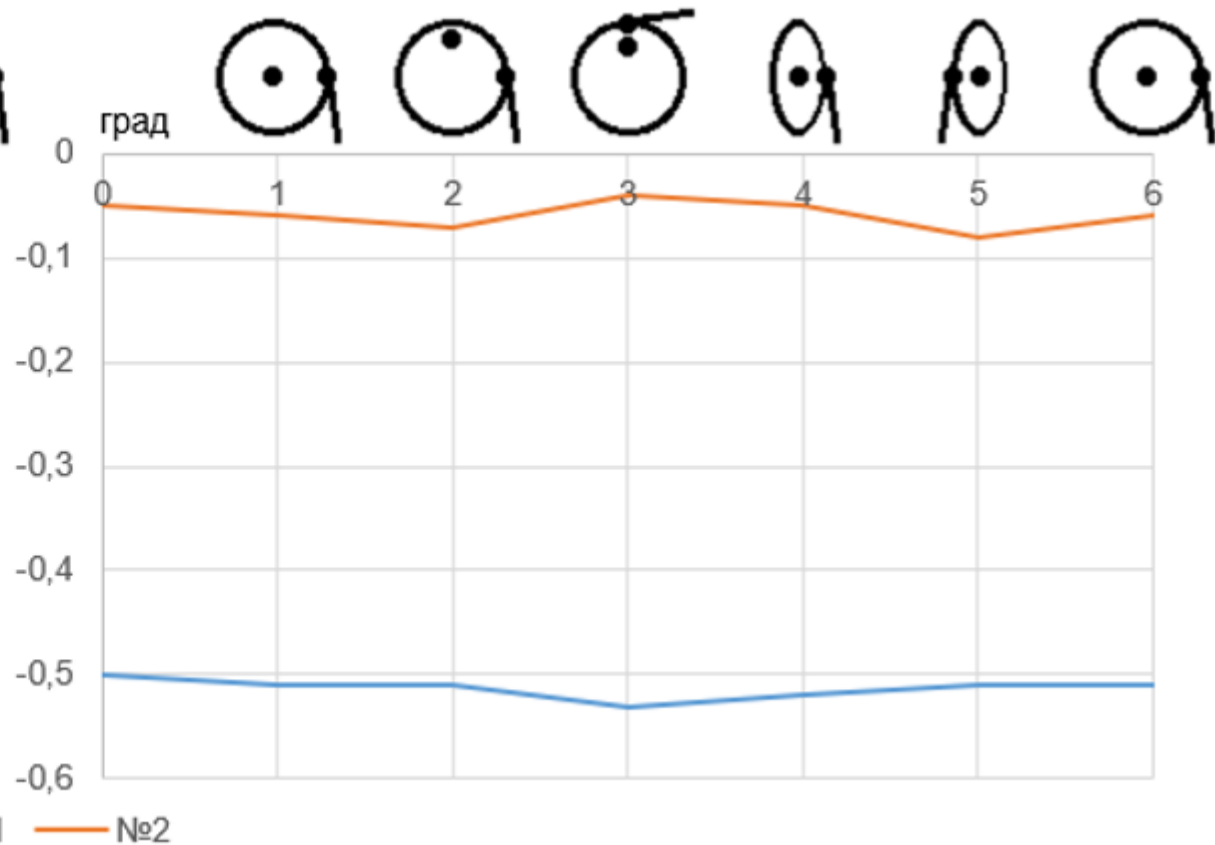
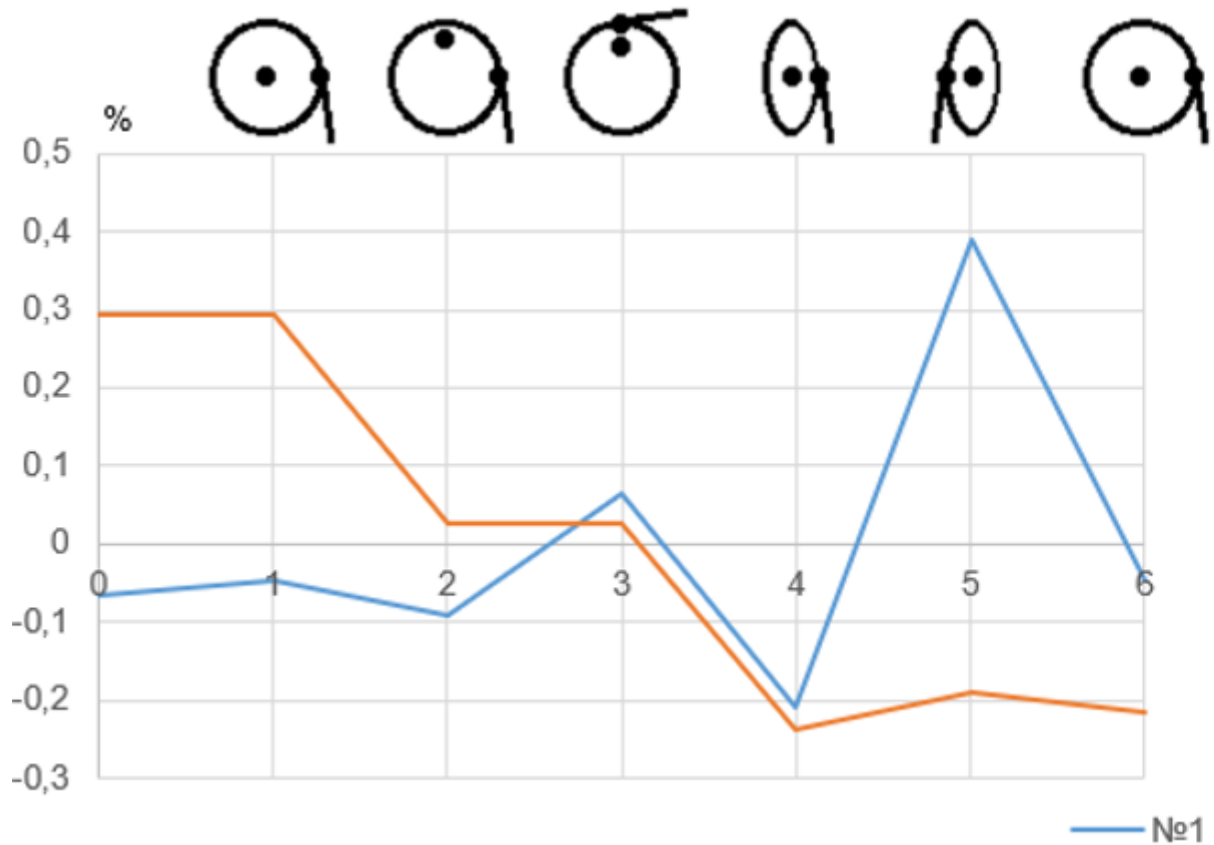


Исследуемые образцы катушек Роговского



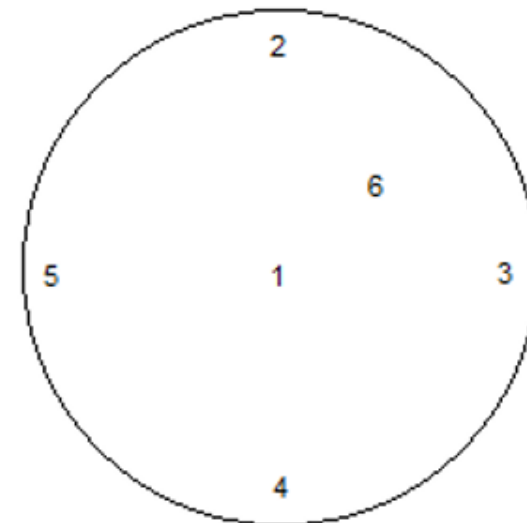
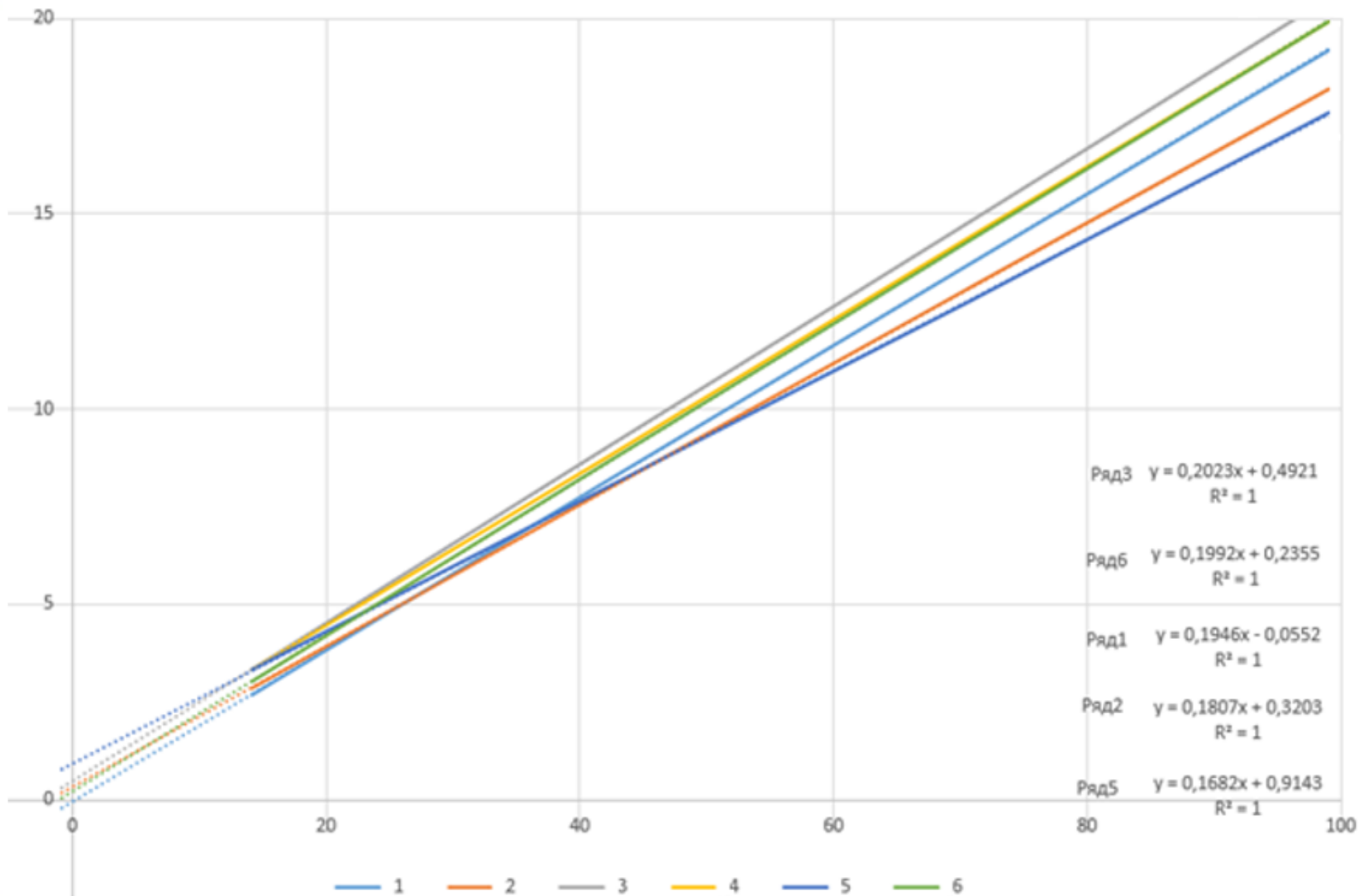


Исследование катушек Роговского: влияние положения токопровода на погрешность





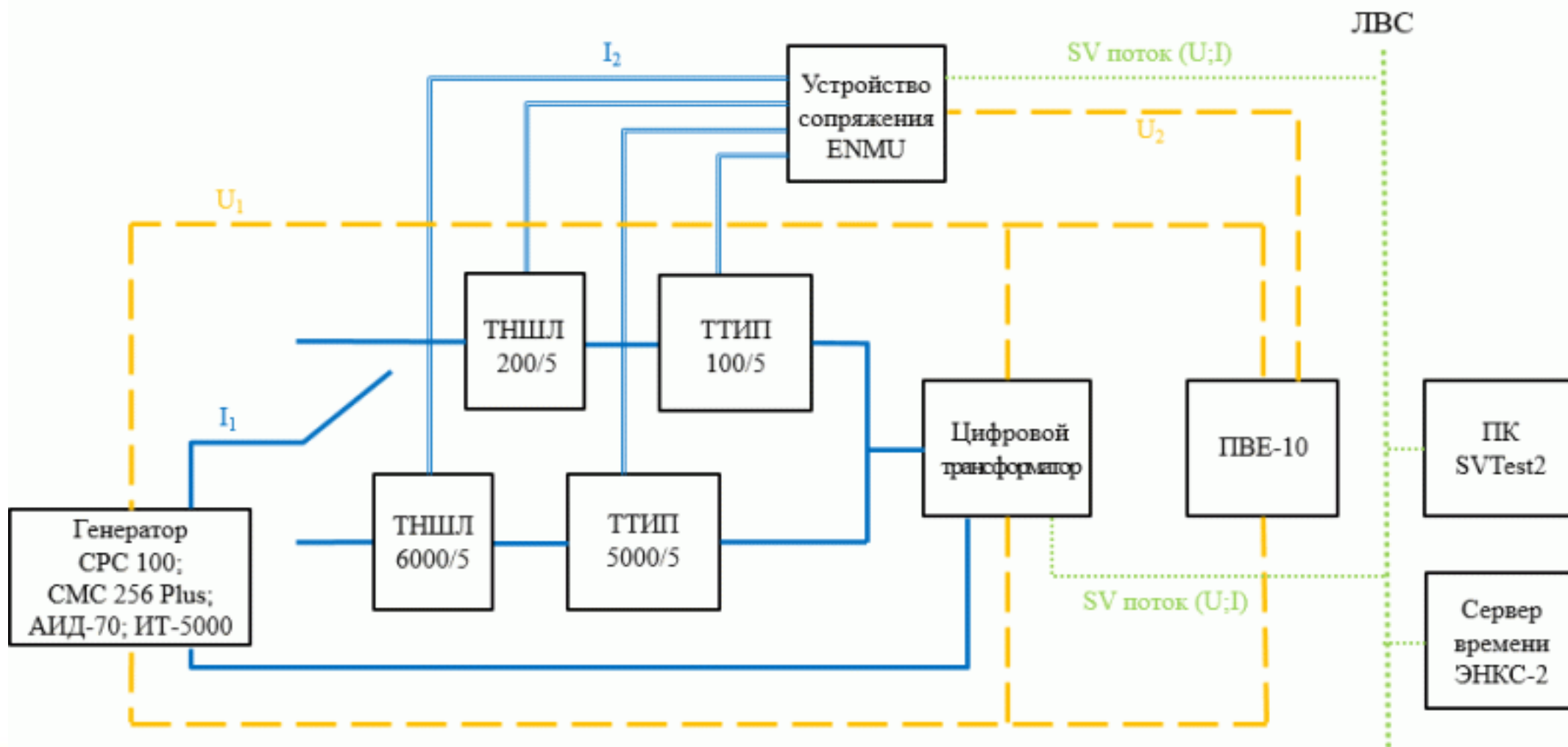
Исследование катушек Роговского: влияние положения токопровода на линейность



ПТК для испытаний трансформаторов



Структурная схема ПТК «ECIT Test»





Интерфейс ПО для испытаний трансформаторов

SVTest2 1.0.0.40 (18.07.2022) 50 Гц

Файл Параметры Информация

Режим работы: Сравнение потоков
Генератор: Dummy
Компаратор: Энергомонитор-61850
Хост: 192.168.0.101
Порт: 5025
 Программный расчет RMS (только управление)

Подключить Отключить Параметры Подключить Отключить Параметры

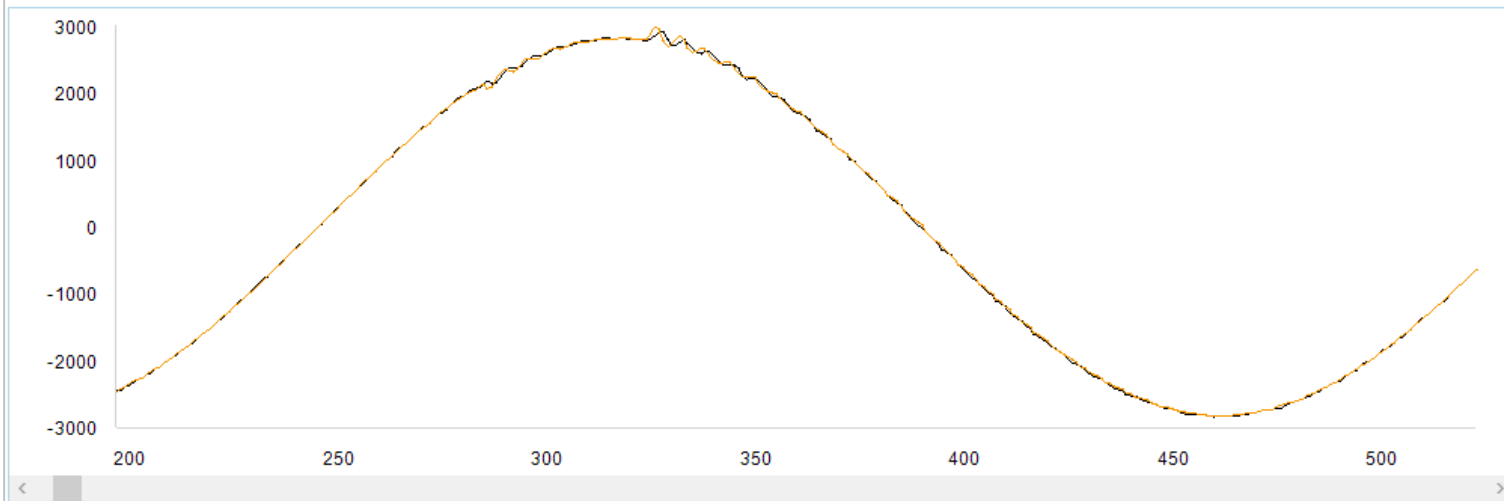
SV Потоки Приборы

Интерфейс: Ethernet
Эталонный: ECIT2881234
Поверяемый: ENS256MUnn01
Параметры

Сигнал Сводная таблица Гармоники Осциллограммы Смещение потока Погрешности осциллограмм

Ua Ia Отображать последний полученный фрейм
 Ub Ib Отображать эталонный поток
 Uc Ic
 U0 I0 Отображать проверяемый поток

Разница SmpCnt: 1



Пуск Стоп Пауза Продолжить Текущая поверка 23,737 X

< >

Генерация сигнала 1



Интерфейс ПО для испытаний трансформаторов

SVTest2 1.0.0.40 (18.07.2022) 50 Гц

Файл Параметры Информация

Результаты поверки **Просмотр протокола**

Прибор ENS256MUnn01

Сценарии

Состояния генератора

Шаги

1

	A	B	C
U, В	500,000	500,000	500,000
I, А	1,000	1,000	1,000
$\alpha U, ^\circ$	0,000	-120,000	120,000
$\alpha I, ^\circ$	0,000	-120,000	120,000
F, Гц	50,000		

Доп. сигнал [Отсутствует](#)

Пуск

Стоп

Пауза

Продолжить

Текущая поверка 11,225 X

Исследование_15.12.2022 (4) X

Сводная таблица (RMS) Таблица/Графики (RMS) Гармоники Измерения Измерения (Эталон) Осциллограммы Смещение потока RMS (Расчет) SmpCnt

Отображать легенду

SmpCnt 6994

Эталонная осциллограмма

Измеряемая осциллограмма

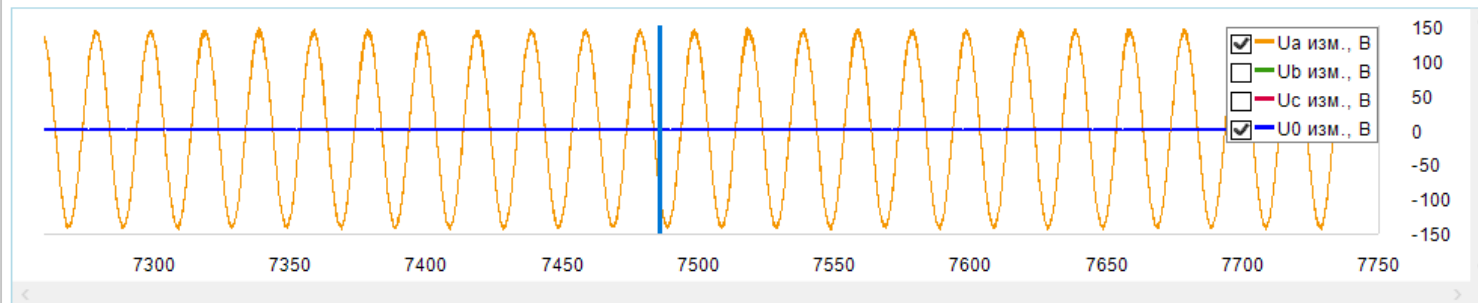
Относительная погрешность (RMS)

Мгновенная погрешность

Скопировать все значения

Напряжение

	Эт.	Изм.	InstError, %	DC эт.	DC изм.	ΔDC	U эт., В	U изм., В	$\delta U, \%$
Ua	-104,480	-95,381	1,2868	-2,9094	-0,0833	2,8261	101,0009	99,9299	-0,1515
Ub	0,000	0,030	0,0042	0,0000	-0,0024	-0,0024	0,0000	0,0250	0,0000
Uc	0,000	0,030	0,0042	0,0000	-0,0028	-0,0028	0,0000	0,0253	0,0000
U0	0,000	0,030	0,0042	0,0000	0,0030	0,0030	0,0000	0,0260	0,0000



Ток

Сохранение полученных данных

Интерфейс ПО для испытаний трансформаторов



SVTest2 1.0.0.40 (18.07.2022) 50 Гц

Файл Параметры Информация

Результаты поверки Просмотр протокола

Прибор ENS256MUnn01

Сценарии

Состояния генератора

Шаги

1

	A	B	C
U, В	500,000	500,000	500,000
I, А	1,000	1,000	1,000
$\alpha U, ^\circ$	0,000	-120,000	120,000
$\alpha I, ^\circ$	0,000	-120,000	120,000
F, Гц	50,000		

Доп. сигнал [Отсутствует](#)

Сводная таблица (RMS) Таблица/Графики (RMS) Гармоники Измерения Измерения (Эталон) Осциллограммы Смещение потока RMS (Расчет) SmpCnt

Отображать легенду

SmpCnt 7177

Эталонная осциллограмма

Измеряемая осциллограмма

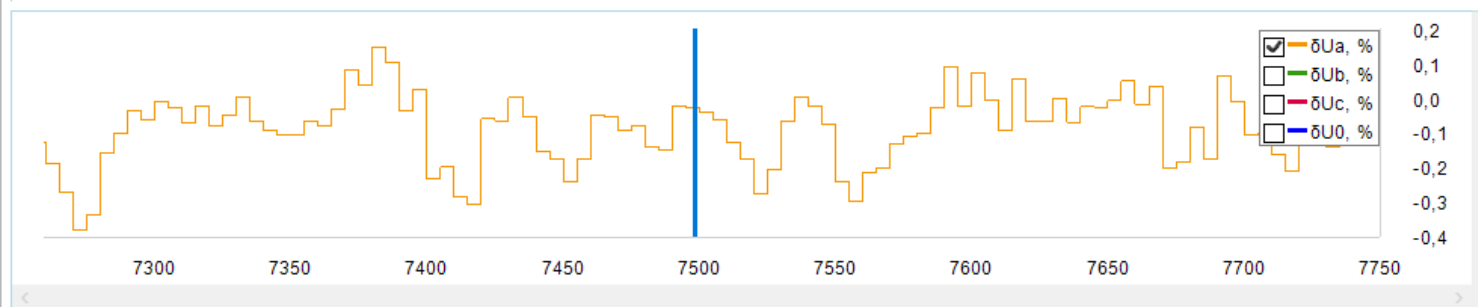
Относительная погрешность (RMS)

Мгновенная погрешность

Скопировать все значения

Напряжение

	Эт.	Изм.	InstError, %	DC эт.	DC изм.	ΔDC	U эт., В	U изм., В	$\delta U, \%$
Ua	126,080	140,972	2,1060	-3,2230	-0,0896	3,1334	100,1083	99,9132	-0,0276
Ub	0,000	-0,010	-0,0014	0,0000	-0,0004	-0,0004	0,0000	0,0254	0,0000
Uc	0,000	-0,010	-0,0014	0,0000	0,0003	0,0003	0,0000	0,0256	0,0000
U0	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0008	0,0008	0,0000	0,0251	0,0000



Ток

Пуск

Стоп

Пауза

Продолжить

Текущая поверка 11,225 ✕

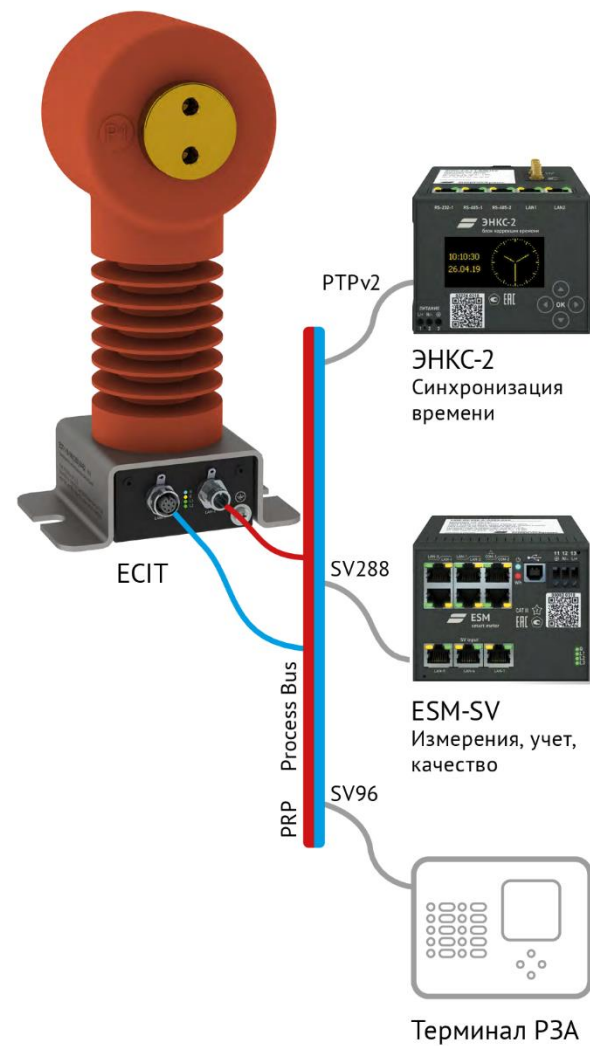
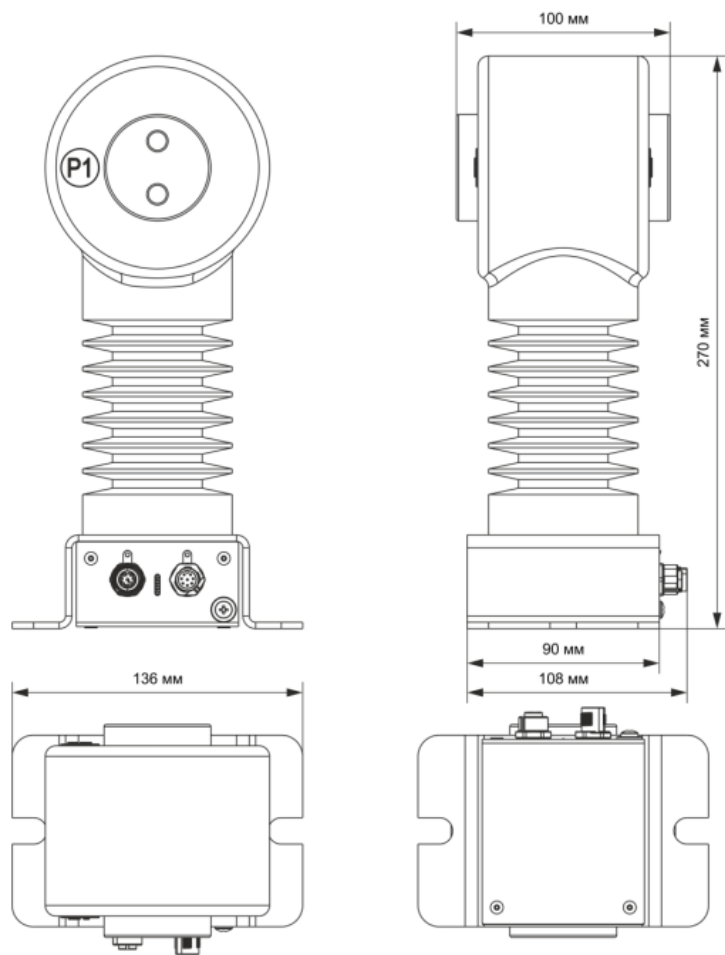
Исследование_15.12.2022 (4) ✕

<

>

Сохранение полученных данных

С учетом опыта и исследований



Метрологические характеристики трансформатора



Метрологические и технические характеристики

Таблица 2 – Метрологические характеристики

Наименование характеристики	Значение
Номинальное напряжение переменного тока $U_{ном}$, В	11000/√3
Класс точности для измерений (в диапазоне от $0,2 \cdot U_{ном}$ до $1,2 \cdot U_{ном}$) по ГОСТ 1983-2015 (ГОСТ Р МЭК 60044-7-2010)	0,5
Пределы допускаемой относительной погрешности коэффициента масштабного преобразования напряжения (для измерений), %	±0,5 при $0,2 \cdot U_{ном} \leq U \leq 1,2 \cdot U_{ном}$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности угла фазового сдвига напряжения (для измерений), '	±20 при $0,2 \cdot U_{ном} \leq U \leq 1,2 \cdot U_{ном}$
Номинальный коэффициент перенапряжения F_v по ГОСТ Р МЭК 60044-7-2010	1,9
Класс точности для защиты (в диапазоне от $0,005 \cdot U_{ном}$ до $1,9 \cdot U_{ном}$) по ГОСТ 1983-2015 (ГОСТ Р МЭК 60044-7-2010)	3P
Пределы допускаемой относительной погрешности коэффициента масштабного преобразования напряжения (для защиты), %	±3 при $0,005 \cdot U_{ном} \leq U \leq 1,9 \cdot U_{ном}$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности угла фазового сдвига напряжения (для защиты), '	±120 при $0,005 \cdot U_{ном} \leq U \leq 1,9 \cdot U_{ном}$

Метрологические и технические характеристики

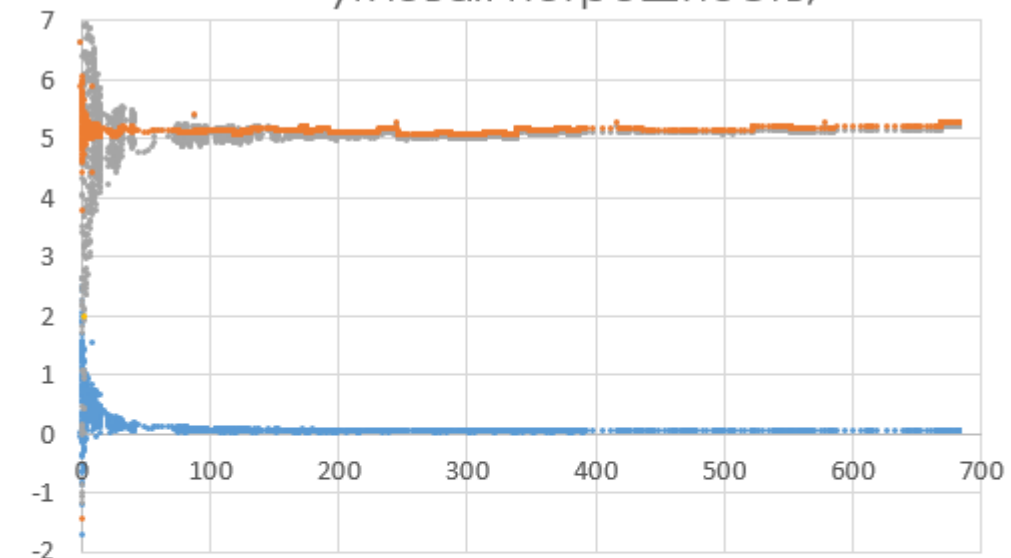
Таблица 2 – Метрологические характеристики

Наименование характеристики	Значение
Номинальный первичный ток $I_{ном}$, А	100
Номинальный коэффициент превышения первичного тока $K_{пр}$	12,5
Номинальный расширенный первичный ток $I_{ерп}$, А	1250
Класс точности для измерений (в диапазоне от $0,01 \cdot I_{ном}$ до $12,5 \cdot I_{ном}$) по ГОСТ 7746-2015 (ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010)	0,5S
Пределы допускаемой относительной токовой погрешности (для измерений), %	±0,75 при $0,01 \cdot I_{ном} \leq I < 0,05 \cdot I_{ном}$ ±0,5 при $0,5 \cdot I_{ном} \leq I \leq 12,5 \cdot I_{ном}$
Пределы допускаемой абсолютной угловой погрешности (для измерений), '	±45 при $0,01 \cdot I_{ном} \leq I < 0,05 \cdot I_{ном}$ ±30 при $0,5 \cdot I_{ном} \leq I \leq 12,5 \cdot I_{ном}$
Номинальный коэффициент предельной кратности K_{ssc}	300
Класс точности для защиты (в диапазоне от $I_{ном}$ до $300 \cdot I_{ном}$) по ГОСТ 7746-2015 (ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010)	5P
Пределы допускаемой относительной полной токовой погрешности (для защиты), %	±5 при $I_{ном} \leq I \leq 300 \cdot I_{ном}$
Пределы допускаемой относительной токовой погрешности (для защиты), %	±1 при $I_{ном} \leq I \leq 300 \cdot I_{ном}$
Пределы допускаемой абсолютной угловой погрешности (для защиты), '	±60 при $I_{ном} < I < 300 \cdot I_{ном}$
Отклонение времени внутренних часов от всемирного координированного времени UTC при наличии внешней синхронизации, мкс	±1

Погрешности ТТ на основе катушки Роговского



угловая погрешность, °

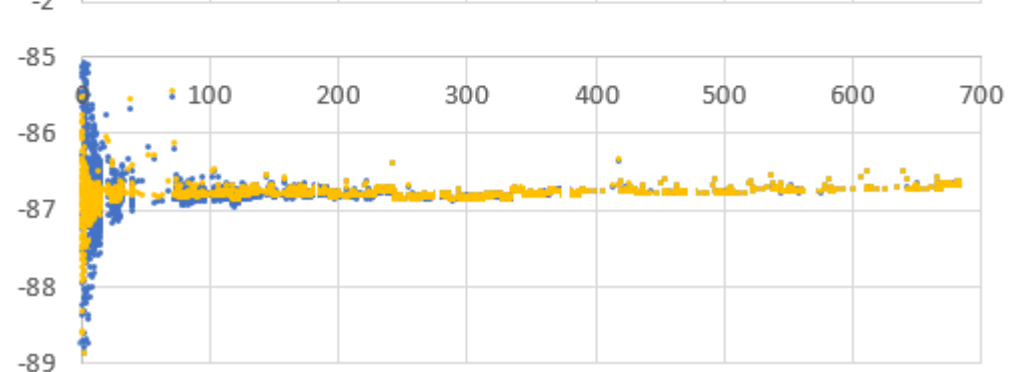


интегр
интегр

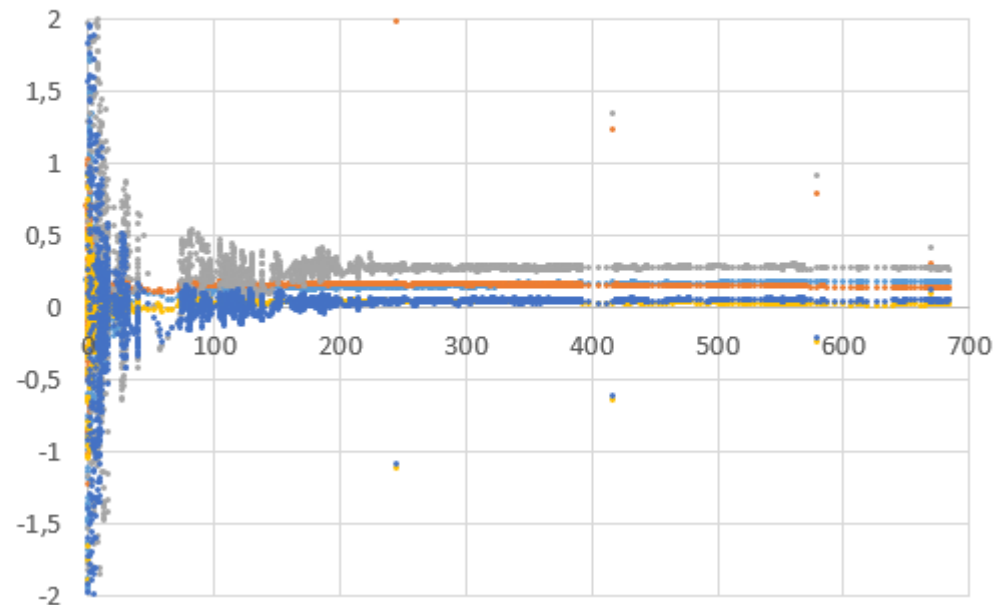
защитный
измерительный
референс

исходный
исходный

защитный
измерительный



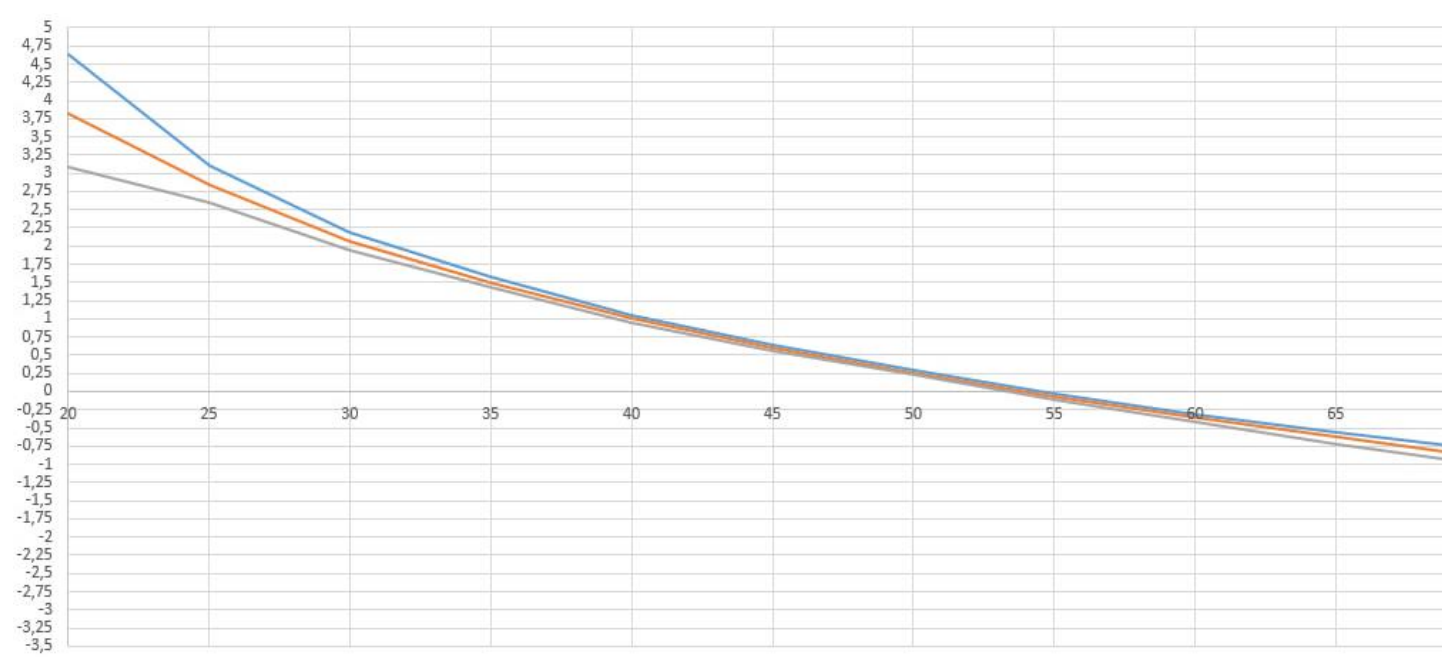
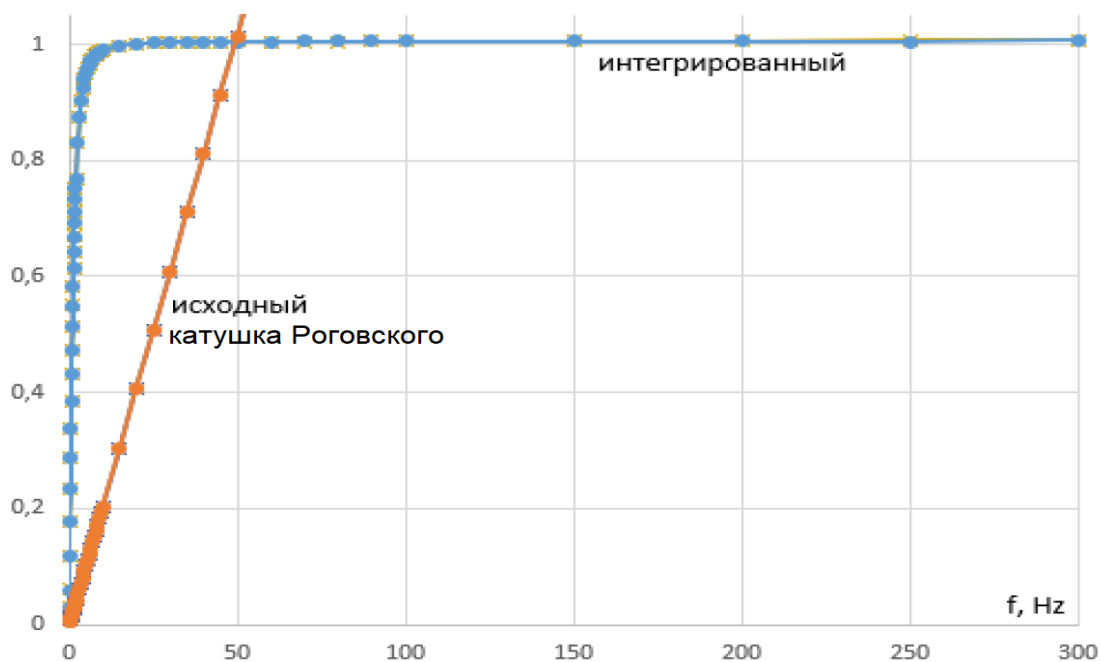
амплитудная погрешность, %





Исследования АЧХ и ФЧХ

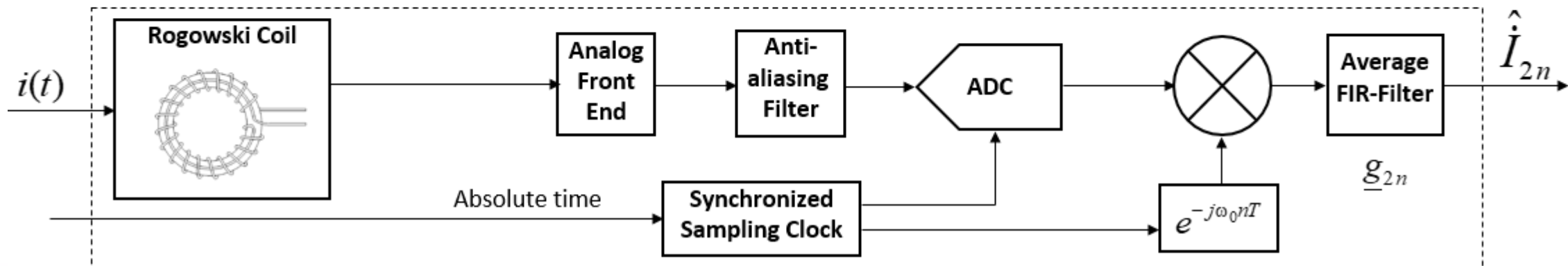
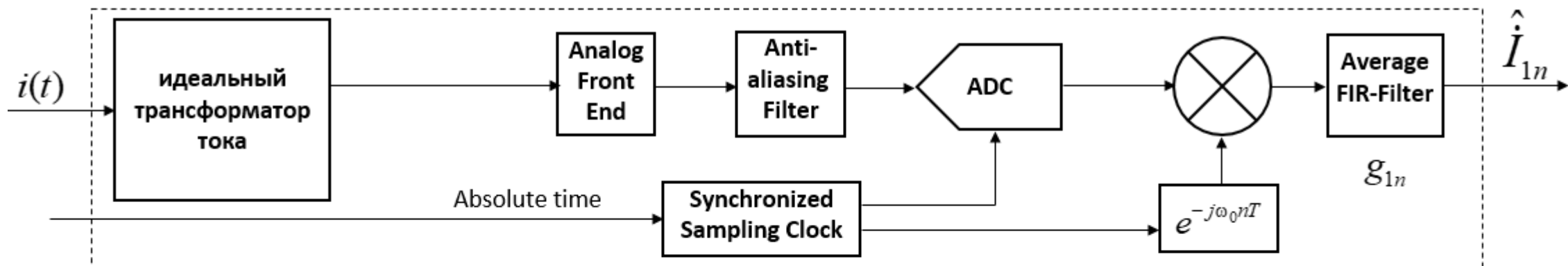
АЧХ катушки Роговского и АЧХ/ФЧХ после преобразования (интегрирования)





ЕСИТ: Цифровая обработка сигнала

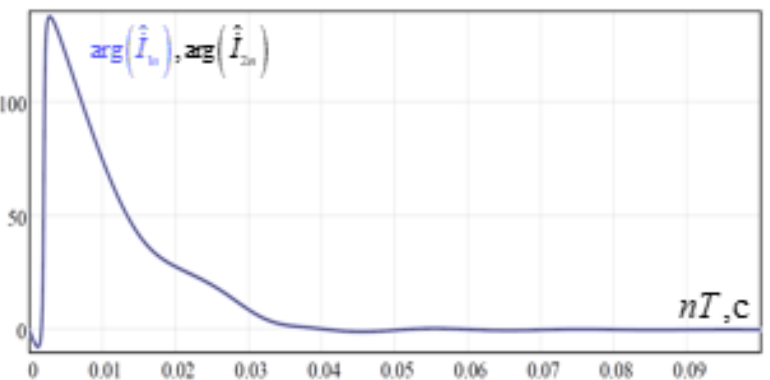
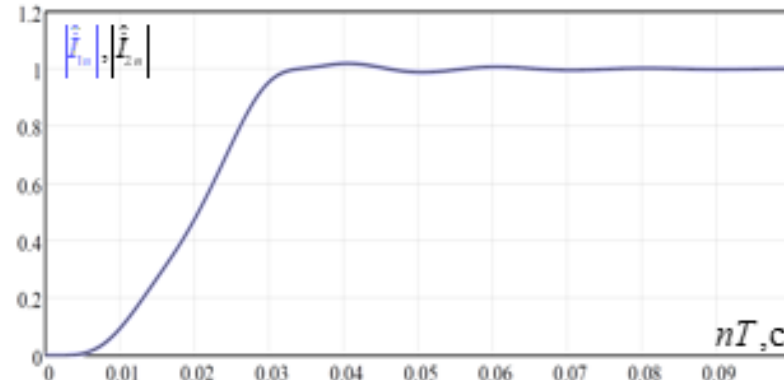
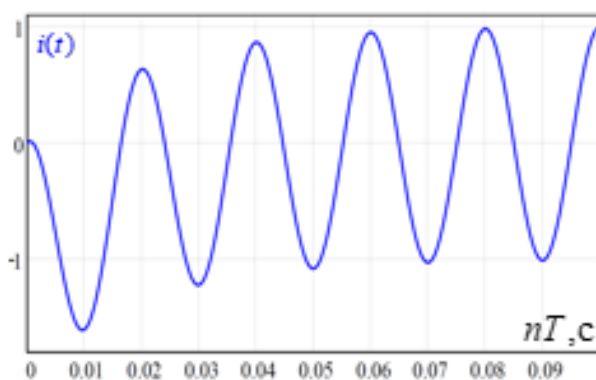
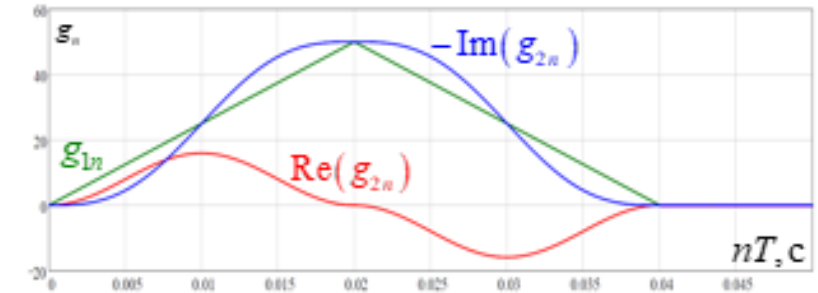
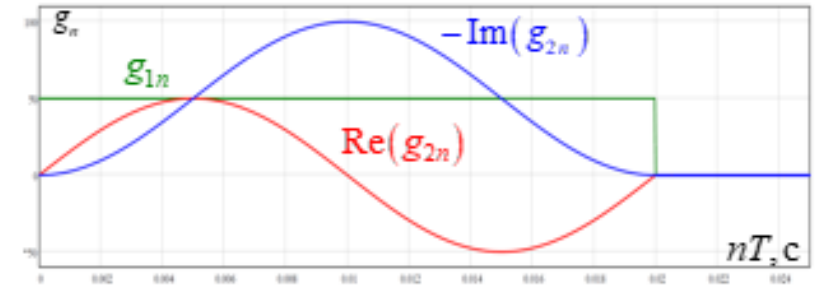
Отличительная особенность первичных измерительных преобразователей тока на основе катушки Роговского связана с пропорциональностью выходного сигнала производной первичного тока. Поэтому в ЕСИТ производится дополнительная цифровая обработка сигналов для восстановления первичного тока с последующим формированием SV-поток и обработка сигналов для формирования синхровекторов тока.





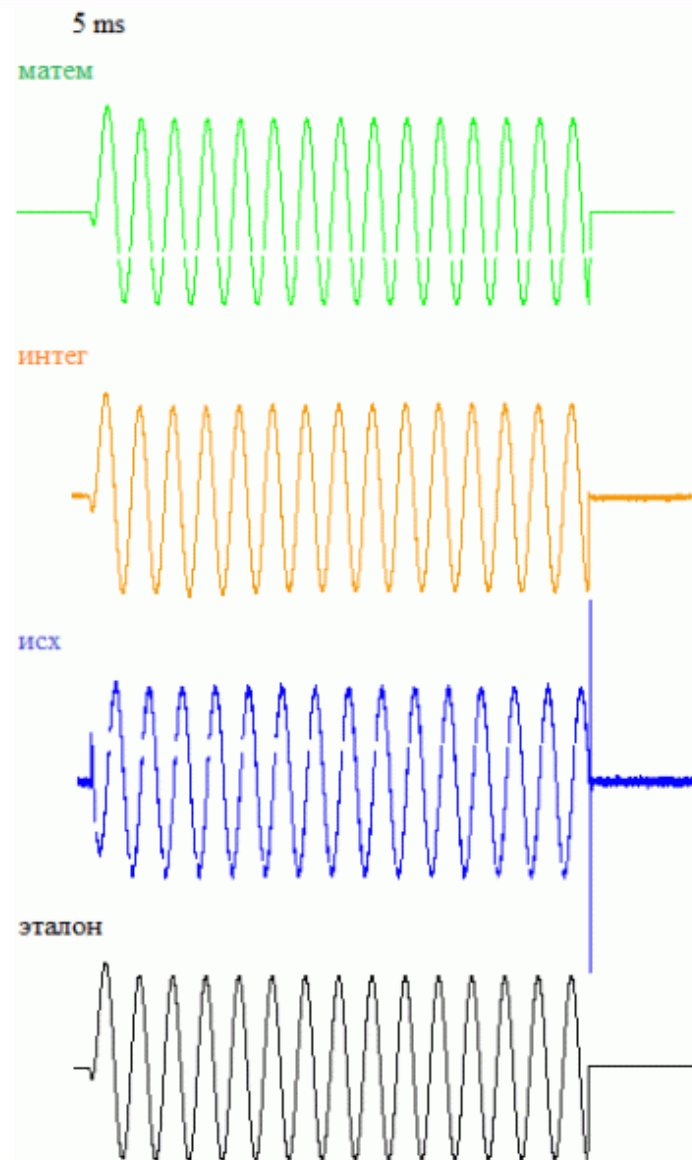
ЕСИТ: Измерение синхровекторов

Разработан метод синтеза цифровых фильтров для формирования синхровекторов с учетом особенностей катушки Роговского. При этом вместо усредняющего КИХ-фильтра, необходимо использовать КИХ-фильтр с комплексной импульсной функцией. В качестве примера приведена импульсная функции фильтра в виде треугольника исходного КИХ-фильтра (зеленый цвет) и вещественная (красный цвет) и мнимая с обратным знаком (синий цвет) части синтезированной комплексной импульсной функции фильтра в случае использования катушки Роговского.





ЕСІТ: исследования динамических характеристик





Цифровое КРУ

Цифровая ячейка
6-10кВ
на базе ПТК ES-GEAR



ШИНА ПОДСТАНЦИИ МЭК 61850-8-1 (MMS, GOOSE), SNTP, РТР



Многофункциональное
устройство РЗА с
функцией контроля
присоединения

ENBC-PR



Цифровой счетчик
электроэнергии,
ПКЭ и МИП

ESM-SV



100Base-TX, МЭК 61850-9-2 SV



A



B



C

Комбинированный трансформатор тока и
напряжения с двумя цифровыми шинами
стандарта: 100Base-TX (МЭК 61850-9-2LE)

ECIT-1



Архитектура ЦПС



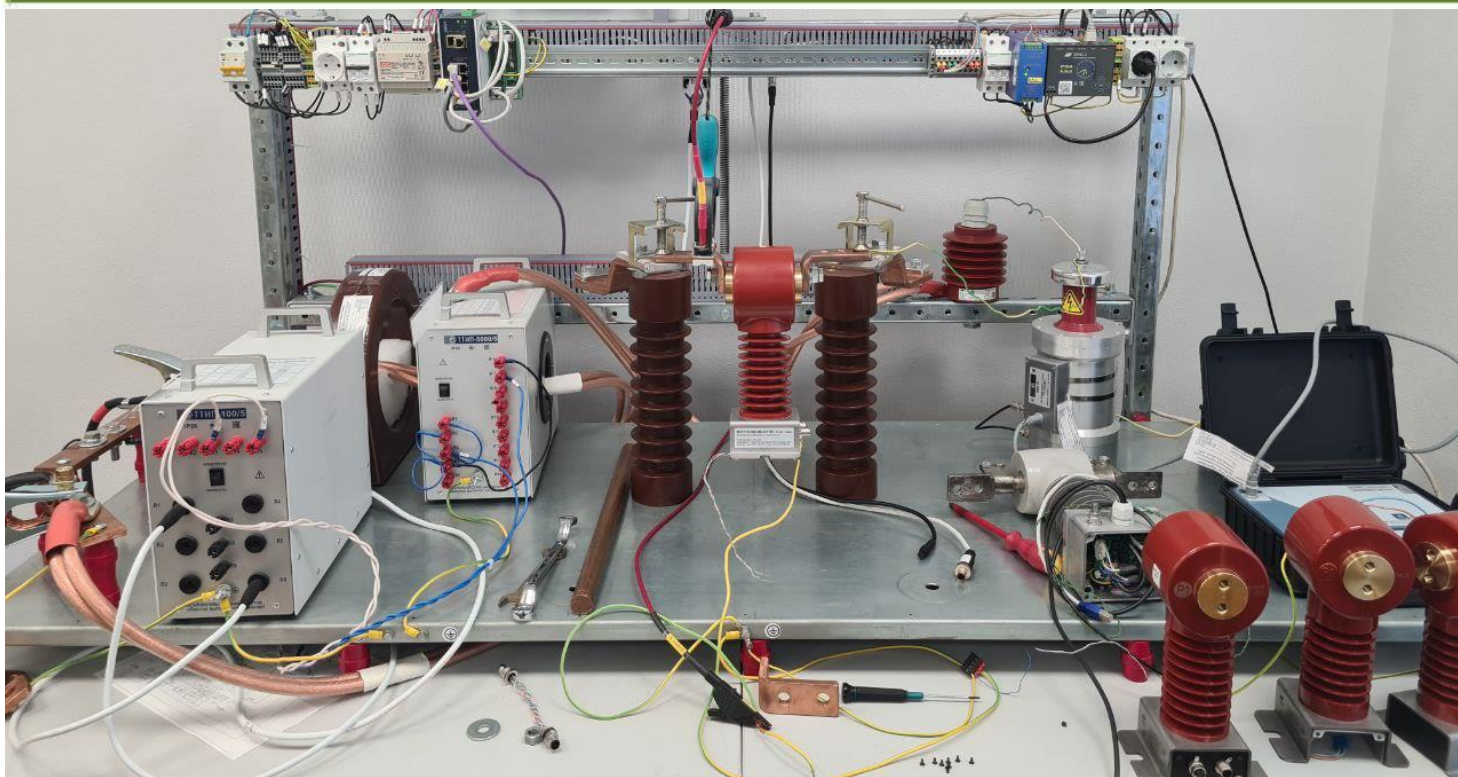
Традиционные
ТТ, ТН
1/5А 57/100 V

Традиционные
ТТ, ТН
и устройства сопряжения

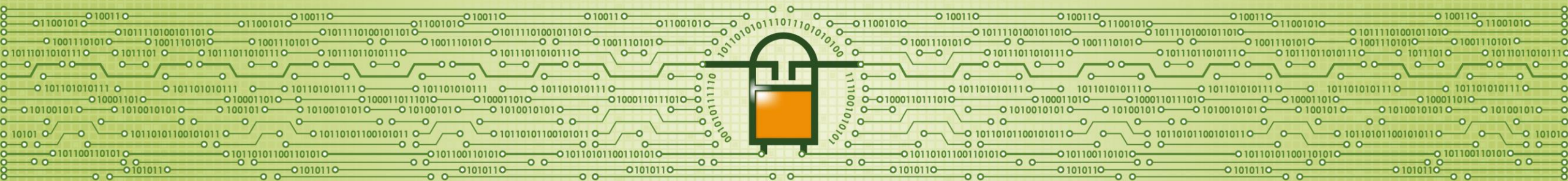
Цифровые
цТТ, цТН
МЭК 61850-9-2

Комбинированный ТТН
с цифровым выходом

Заключение



1. Преобразователи тока на основе катушки Роговского позволяют успешно применять их для ИЭУ различного функционального назначения, в том числе для устройств релейной защиты и автоматики, и для многофункциональных измерительных устройств.
2. Указанные первичные измерительные преобразователи не уступают по точности электромагнитным измерительным трансформаторам тока в стационарных режимах, но превосходят их по диапазонам измерений тока и точности в переходных режимах работы энергосистем.



СПАСИБО!

Контакты:

Плакидин Роман Сергеевич

Ведущий инженер по метрологии ООО "Инженерный центр "Энергосервис"

8 (911) 5647090, rplakidin@ens.ru