

# Опыт, полученный при реализации проектов по построению цифровых подстанций с применением оптических трансформаторов

Современная сетевая инфраструктура требует повышения наблюдаемости и управляемости сети. Контроль за параметрами сети становится более требователен к качеству измерения в широких диапазонах первичных токов и несинусоидальных режимах работы. Измерения токов и напряжений, проводимые классическими измерительными трансформаторами, в таких условиях становятся недостаточно эффективными, и фокус внимания смещается на электронные измерительные трансформаторы. Настоящая статья призвана транслировать опыт применения оптических трансформаторов тока на наиболее ярких пилотных проектах, выполненных в стране за последнее время.

**Автор**  
Янин М.А.

**П**ервый российский оптический трансформатор тока появился в Фрязинском институте радиотехники и электроники им. Котельникова в 2005–2006 гг. С 2010 года разработку начала финансировать компания Роснано на базе компании Профотек, и сейчас ее продукция удалось встать в один ряд с продукцией таких известных производителей цифровых трансформаторов, как ABB, Alstom и Artech.

Для превращения своей продукции в серийную компании Профотек пришлось реализовать ряд пилотных проектов, в рамках которых кроме выявления и устранения недочетов в конструкции изделия основной Заказчик пытался получить ответ на более глобальные вопросы, связанные с концепцией реализации ЦПС. Эти вопросы и ответы на них приведены в конце статьи.

Дадим краткое описание каждого из наиболее интересных пилотных проектов.

## **Полигон цифровой подстанции на Нижегородской ГЭС (РусГидро)**

Этот проект стал одним из первых проектов реализации ЦПС в России. Он начался с создания концепции построения и работы цифровой под-

станции. Первые сложности начались еще на стадии проектирования:

- проект несколько раз оптимизировался для достижения полной совместимости с релейной защитой различных поставщиков;
- при выборе номиналов трансформаторов для ЦПС были использованы завышенные номиналы, используемые для классических трансформаторов;
- несколько раз вносились изменения в часть проекта, описывающую сетевую инфраструктуру.

Дальнейшая реализация проекта выявила массу конструктивных и алгоритмических недоработок во всем оборудовании, входившем в состав полигона. В части измерительных трансформаторов это:

- подходы к высоковольтной изоляции, качеству и технологии сборки, отбору компонентов и поставщиков;
- недоработки в решении по организации оптического питания систем измерения. Опыт показал, что через несколько лет эксплуатации при неблагоприятных климатических условиях может возникнуть деградация фотовольтаических элементов.

Необходимо отметить, что опыт участия в данном проекте позволил Профотек значительно повысить качество и надежность выпускаемых изде-

лий. Были внедрены новые регламенты приемосдаточных испытаний, переработана высоковольтная колонна – теперь полость внутри нее, в которой проходит оптический кабель, заполняется специальным диэлектрическим гелем, значительно расширен динамический диапазон измерений трансформаторов, в системах питания систем измерения напряжения применено электрическое питание с полной гальванической развязкой.

Кроме того, участие в пусконаладке и опытной эксплуатации полигона позволило выявить слабые места в системе, требующие больше внимания при строительстве ЦПС:

- сетевая инфраструктура, при неправильном построении которой может возникнуть хаос в работе подстанции;
- система синхронизации времени. Когда система недостаточно точно обрабатывает потерю спутника, у сложных технических систем нарушается синхронизация времени. Это приводит к тому, что терминалы работают с привязкой ко времени с одной скоростью, трансформатор – с другой. При нечетких нормах выхода на режим и отработке статусов синхронизации времени возникают сложности с работой системы.

Последний урок, полученный на данном полигоне, применим не только к данному проекту, но и ко всем объектам, использующим оборудование различных производителей. Мы рекомендуем эксплуатирующим организациям усилить контроль за действиями производителей, в особенности теми, которые затрагивают чужое оборудование. Желательно производить работы на действующих системах силами обслуживающего персонала подстанции для сохранения работоспособности и исключения непреднамеренных вмешательств.

### Пилотный проект ЦПС с централизованными и децентрализованными защитами ПАО «Транснефть» на подстанциях 110 кВ Уват и 110 кВ Десна

Пилотный проект интересен в первую очередь тем, что на данных подстанциях установлены оптические трансформаторы как на высокой (110 кВ), так и на низкой (6 кВ) сторонах, тем самым обеспечена возможность работы защит ЦПС в полном объеме. В качестве терминалов РЗА и серверов времени применена продукция компании ЭКРА, шины подстан-



ции и процесса реализованы на коммутаторах Siemens RuggedCom.

В период опытной эксплуатации данных проектов был наработан значительный опыт эксплуатации, который уже был учтен в конструктиве и встроеном ПО как ТТЭО и ДНЕЭ, так и терминалов РЗА и серверов времени СВ-04. Обновленное с учетом полученных наработок оборудование находится в работе с постоянным контролем со стороны эксплуатации и производителей.

Основной вывод: для успешной работы ЦПС большого объема необходимо выполнение дополнительного контроля за серверами времени (реализованный в том числе – в электронных трансформаторах



и терминалах РЗА), коммутаторами, а также – обеспечение требований ЭМС с нормами, превышающими указанные в ГОСТ Р МЭК 60044. Необходимо дополнительное исследование работы серверов времени в нагруженных сетях с PRP.

### Натурные испытания аналоговых и цифровых защит, проведенные в независимой лаборатории CESI (Милан) по заказу сетевой компании TERNА

В предварительном отборе поставщиков измерительных трансформаторов для ЦПС в качестве основного решения были отобраны ТТЭО и ДНЕЭ производства АО «Профотек», поставляемые в Европу под совместным брендом CONDIS/Profotech. Для тестов был изготовлен трехфазный ТТЭО с гибкими чувствительными элементами, позволяющими упрощенную установку на существующие выводы реакторов и трансформаторов, а так же трехфазный ДНЕЭ без емкостных делителей (для упрощения процедуры тестирования напряжение 57,7 В от источника подавалось на внешние измерительные модули, устанавливаемые в нижнем плече делителей). В качестве вторичных устройств тестировались наиболее распространенные модели защит, используемые на объектах компании TERNА: SEL 421, SIEMENS Siprotec 5 7SA87 и ABB REL 670. Причем в тесте использовались одновременно по 2 терминала указанных моделей каждо-



Таблица 1. Участвовавшие в тестах защиты

Производитель	Модель	Тип	FW Version
SEL	SEL-421-5 Relay Protection Automation Control	Традиционная	V R324 V0-Z025013-D20180105
SEL	SEL-421-7 Relay Protection Automation Control	IEC-61850-9-2LE	V R324 V0-Z025013-D20180105
Siemens	Siprotec 7SA87 Line Protection	Традиционная	V.07.50
Siemens	Siprotec 7SA87 Line Protection	IEC-61850-9-2LE	V.07.50
ABB	REL670 Line distance protection	Традиционная	V 2.2
ABB	REL670 Line distance protection	IEC-61850-9-2LE	V 2.2

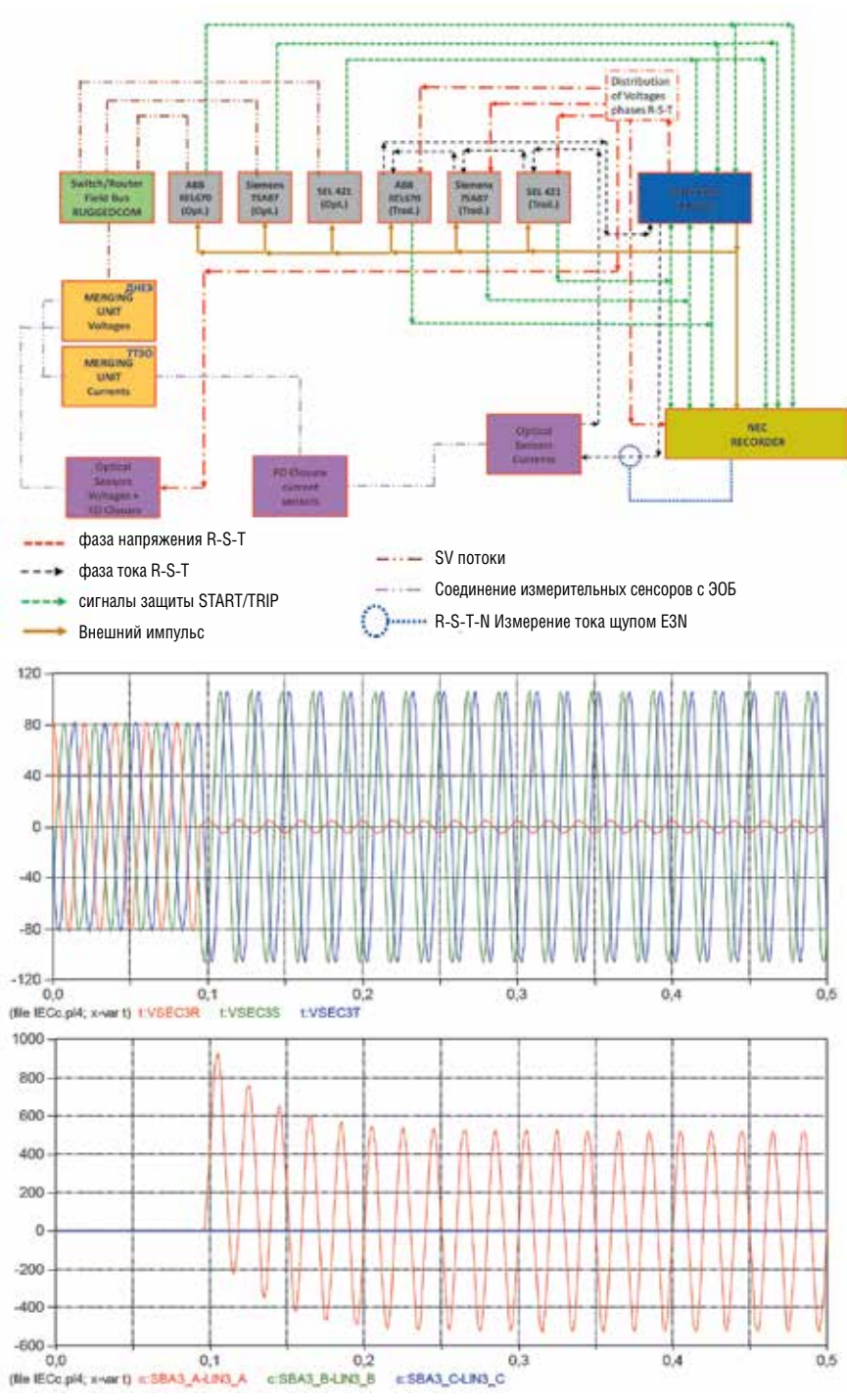


Рис. 1. Осциллограммы одного из тестов

го из производителей – один классический с аналоговыми входами, второй – той же модели, но с цифровыми входами IEC 61850-9-2LE (таблица 1). Синхронизация времени в устройствах происходила от единого источника точноного времени MEINBERG LANTIME M300/GPS по протоколу 1PPS для ТТЭО и ДНЕЭ и протоколам IIRIG-B + NTP для терминалов защит.

Схема включения обеспечивала одновременную подачу трехфазных токов и напряжений на аналоговые входы традиционных защит и на чувствительные элементы ТТЭО и ДНЕЭ. В качестве управляемого источника трехфазных токов и напряжений применялся Omicron CMC356. Для воспроизведения необходимого первичного тока на ТТЭО были применены вспомогательные электрические витки, обеспечивающие необходи-

Таблица 2. Тесты, применяемые при сертификации терминалов РЗА

Тест	ID test
Basic characteristic accuracy under steady state conditions	---
Basic directional accuracy under steady state conditions	---
Determination of accuracy related to time delay setting	IEC-a
Determination of the disengaging time	IEC-b
Dynamic Performance – SIR diagrams	IEC-c
Dynamic Performance – SIR/CVT diagrams	IEC-d
Dynamic Performance - Transient Overreach Tests	---
Steady State Harmonics Tests	---
Transient Oscillation Tests	IEC-e
Steady State Frequency Deviation Tests	---
Transient Frequency Deviation Tests	IEC-f
Double feeded tests for single line	IEC-g
Current reversal test	IEC-h
Evolving faults (only one line affected)	IEC-i
Evolving faults (both lines affected)	IEC-l

мое масштабирование первичного тока по условиям эксперимента. В процессе тестов происходила регистрация факта и времени срабатывания выходного реле терминалов РЗА, а также контроль записанных осциллограмм, функций ОМП и общих параметров функционирования терминалов.

В таблице 2 приведены тесты, применяемые при сертификации терминалов РЗА.

Пример осциллограммы одного из воспроизведенных тестов приведен на рис. 1.

Основным результатом стало подтверждение идентичности срабатывания классических и цифровых защит при подаче тестовых сигналов на ТТЭО и ДНЕЭ во всех тестах. Основной выявленный недостаток – неточное присвоение меток времени цифровых потоков в терминалах при записи COMTRADE файлов.

**Подстанция ПС 500кВ Тобол  
ПАО «ФСК ЕЭС» (Россия)**

Подстанция 500 кВ Тобол – это узловая распределительная подстанция в Тюменской области, которая стала технологическим полигоном для тестирования новых устройств и измерительных систем в электроэнергетике. В рамках этого проекта в конце 2019 года на двух отходящих ВЛ 500 кВ (ЗапСиб-1 и ЗапСиб-2) была реализована информационная подсистема, функционирующая в соответствии с протоколом МЭК 61850-9-2. Главная особенность ВЛ 500 кВ ЗапСиб-1 и ЗапСиб-2 заключается в том, что для измерения электрического тока были установлены

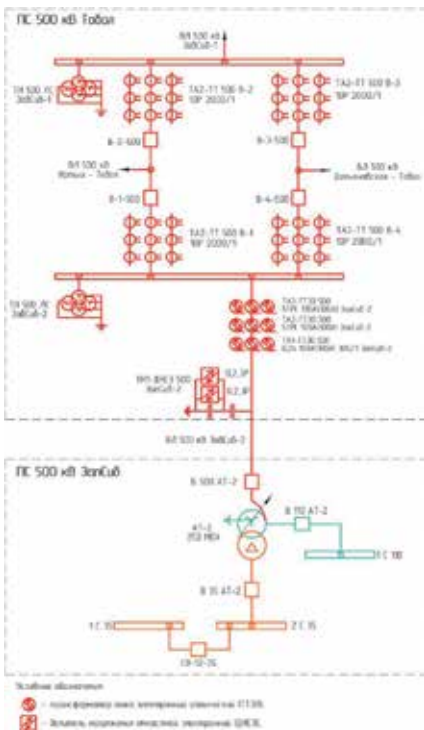


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема связи ПС 500 кВ Тобол и ПС 500 кВ ЗапСиб

трансформаторы тока электронные оптические (ТТЭО) с классом точности 5PFE для нужд РЗА. Для измерения напряжения были установлены делители напряжения емкостные электронные (ДНЕЭ) с классом точности 0,2/3P и 0,2, соответственно.

ВЛ 500 кВ ЗапСиб-1 и ЗапСиб-2 связывают ПС 500 кВ Тобол с ПС 500 кВ ЗапСиб. ПС 500 кВ ЗапСиб – центральная распределительная подстанция (ПС глубокого ввода), которая питает «ЗапСибНефтехим» – самый масштабный в стране комбинат по глубокой переработке углеводородного сырья и выпуску полимерной продукции, входящий в состав крупнейшей нефтехимической компании в России ПАО «СИБУР Холдинг». ПС 500 кВ ЗапСиб оснащена четырьмя АТ 250 МВА, КРУЭ 110 кВ и ЗРУ-35 кВ.

Для оценки работоспособности информационной подсистемы в целом, а также для сравнения рабочих характеристик измерительных трансформаторов во время броска намагничивающего тока (БНТ) был проведен опыт постановки АТ-2 250 МВА под напряжение. На рис. 2 представлена упрощенная электрическая схема, которая отражает связь между ПС 500 кВ Тобол и ПС 500 кВ ЗапСиб по ВЛ 500 кВ ЗапСиб-2.

Для оценки работоспособности информационной подсистемы в целом, а также для сравнения рабочих характеристик из-

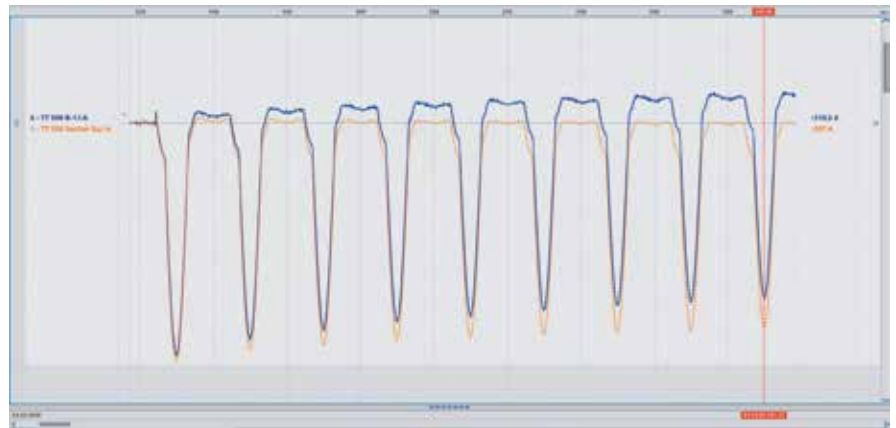


Рис. 3. Насыщение электромагнитных ТТ (синий цвет) и оптических (желтый цвет) ТТ

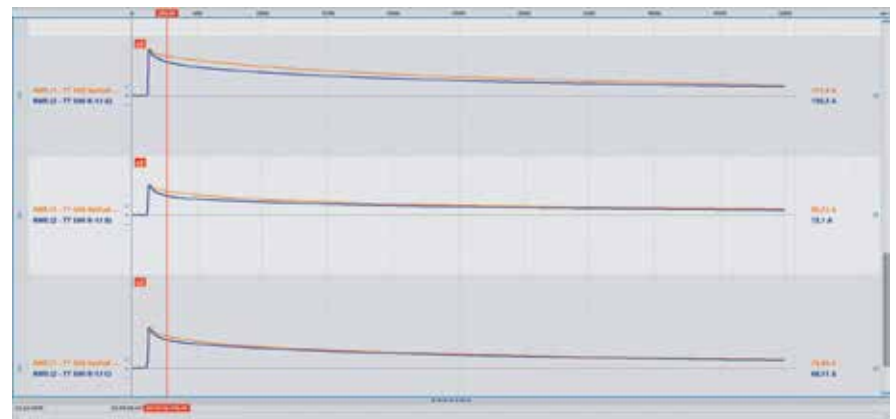


Рис. 4. Разница действующего значения БНТ для с электромагнитных ТТ (синий цвет) и оптических (желтый цвет) ТТ

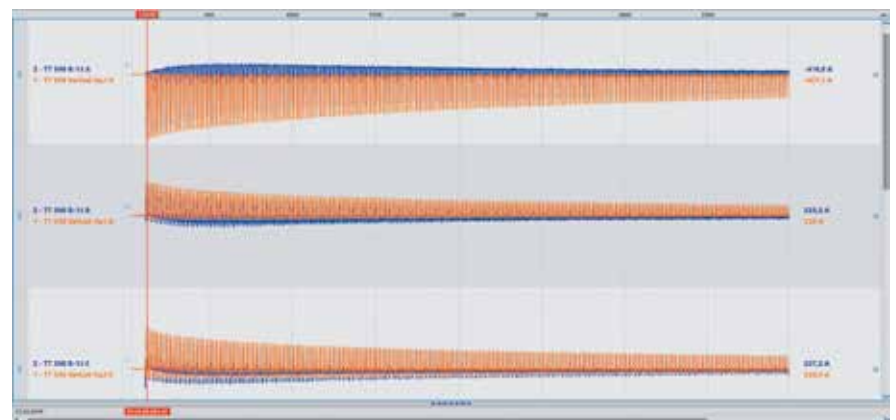


Рис. 5. Смещение кривой тока на электромагнитных ТТ (синий цвет) относительно кривой тока с оптических ТТ (желтый цвет)

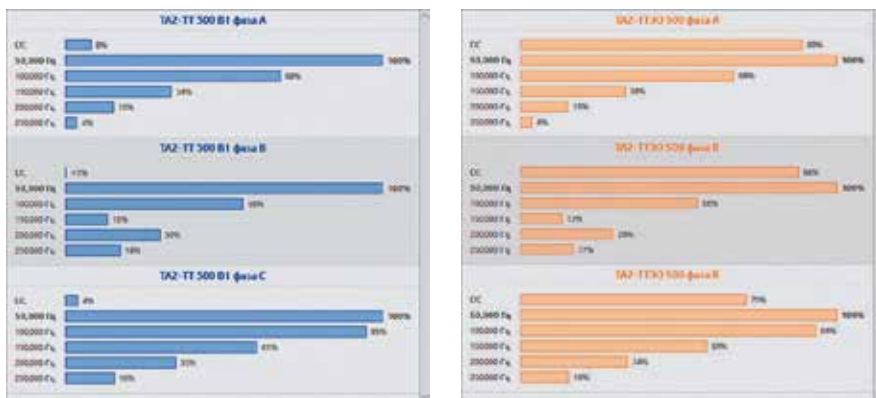
мерительных трансформаторов во время броска намагничивающего тока (БНТ) рабочей группой, созданной СО и ФСК для изучения поведения цифровых систем, был инициирован и проведен опыт постановки АТ-2 250 МВА под напряжение.

Осциллограммы для анализа были записаны регистратором аварийных событий (РАС), который позволяет регистри-

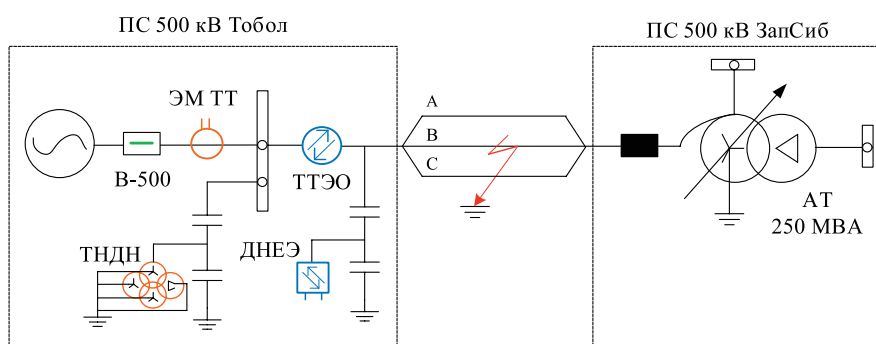
ровать аналоговые и цифровые значения одновременно. При этом РАС подключен на сумму токов по двум плечам (В-1 и В-4) для получения значений аналогового тока на ВЛ 500 кВ ЗапСиб-2.

Основные выводы по результатам анализа осциллограмм:

1. Сравнительный анализ работы электромагнитных и оптических ТТ во время



**Рис. 6.** Гармонический состав электромагнитных ТТ (синий цвет) и оптических ТТ (желтый цвет) в момент времени равный 400 мс



**Рис. 7.** Упрощённая однолинейная схема ЦПС 500 кВ Тобол с отмеченной точкой проведения КЗ

БНТ при постановке АТ-2 250 МВА под напряжение показал явные преимущества оптических ТТ. Это обусловлено отсутствием в оптическом ТТ явления намагничивания, что позволяет, в свою очередь, получать с них более достоверные данные о состоянии работы сети без искажений.

2. Гармонических анализ показал, что уровень передачи DC-составляющей для оптических ТТ выше по сравнению с электромагнитными ТТ.

При этом наблюдается снижение пикового значения, а также уменьшение



а) б)  
**Рис. 8.** Оптические трансформаторы тока в лаборатории КЕМА

действующего значения тока (RMS). DC-составляющая с электромагнитного ТТ со временем затухает, искажая тем самым представление терминалов РЗА о переходном процессе в системе. Таким образом, оптические ТТ потенциально позволяют выполнить защиту Т (АТ) с повышенной чувствительностью и быстродействием.

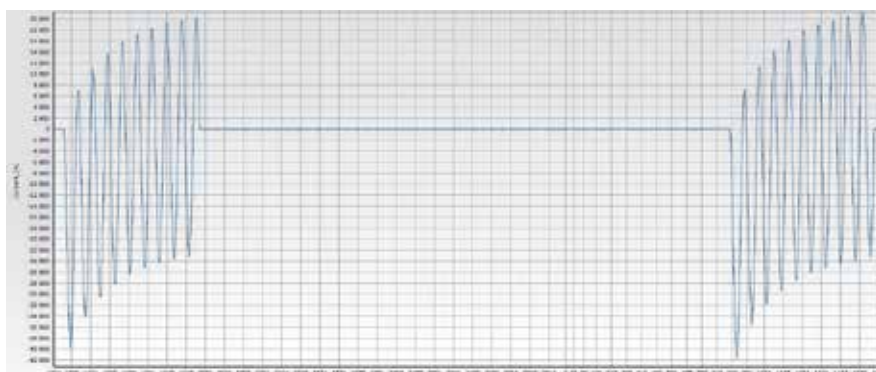
Вторым опытом, проведенным рабочей группой, стал натурный опыт однофазного КЗ, проведенный на ВЛ 500 кВ Тобол – ЗапСиб II, соединяющей ГПП нефтехимического предприятия по глубокой переработке углеводородного сырья «ЗапСибНефтехима» (проект компании «Сибур») и ПС 500 кВ Тобол. Цель опыта КЗ – тестирование работоспособности информационной подсистемы ЦПС 500 кВ Тобол через оценку совместной работы устройств РЗА и цифровых трансформаторов, а также сравнение измерений с электромагнитными трансформаторами тока (ЭМТТ) и трансформаторами напряжения, созданными на емкостных делителях напряжения (ТНДН).

Подробно данный опыт описан в предыдущей статье этого номера. Кратко можно написать, что реализованная цифровая информационная подсистема на ПС 500 кВ Тобол продемонстрировала свою работоспособность во время опыта КЗ.

**Испытательный центр лаборатории КЕМА (г. Арнем, Нидерланды)**

В 2018 году в испытательный центр лаборатории КЕМА было поставлено 2 комплекта ТТЭО. В их составе были шинные трансформаторы тока 550 кВ с диапазоном измерений токов КЗ от 50 А до 180 кА (рис. 8а) и гибкие трансформаторы тока с диапазоном измерения токов КЗ от 500 А до 220 кА (рис. 8б). Цель поставки – использование ТТЭО в качестве эталонного средства измерения при коммутационных испытаниях для регистрации переходных процессов и на испытаниях токами короткого замыкания. В процессе эксплуатации ТТЭО постоянно используется на тестах В-О-В-О (пример осциллограммы – рис. 9), и показал себя как надежный измеритель, не имеющий искажений формы кривой регистрируемых токов.

В ноябре 2019 совместно с сетевой компанией TENNET проводилось тестирование реального однофазного КЗ в трехфазной сети с цифровыми защитами



**Рис. 9.** Пример осциллограммы тестов на включение/отключение выключателя (В-О-В-О)

и трансформаторами АВВ (рис. 10–12), ТТЭО использовался как эталонный прибор, а также, как альтернатива оптическим трансформаторам АВВ в схемах дифференциальной защиты линии.

На графике измерений (рис. 13) видно, что при КЗ традиционный трансформатор насыщается, а оптический позволяет без искажений измерить полный ток КЗ.

Основной вывод: натурным экспериментом подтверждена корректность работы дифференциальной защиты линии при использовании вариантов ТТЭО-АВВ; Оптический ТТ АВВ-АВВ; МУ (АВВ) – АВВ. При сравнении кривых КЗ, полученных от ТТЭО и от оптического ТТ АВВ выявлена их полная идентичность с мгновенной погрешностью не более 0,5 %. В случае применения МУ подтверждается большая зависимость от аналогового ТТ и большее время срабатывания защит.

**Квалификационные испытания оптических трансформаторов тока для поставки на пилотный проект 750 кВ Saguenay (Канада) компании Hydro Quebec**

В 2018–2019 гг. в исследовательском центре IREQ (Монреаль, Канада) проводились квалификационные испытания доступных на рынке оптических трансформаторов тока с целью определения поставщика решения для пилотного проекта 750 кВ строящейся подстанции Saguenay. В качестве поставщика рассматривались трансформаторы Artech, АВВ, GE (USA), GE (бывш. Alstom / NXTphase), Trench (Siemens) и Профотек (под совместным брендом CONDIS/Profotech). Исследования включали в себя многостадийные отборочные испытания, включающие в себя: погрешности в рабочем и релейном диапазоне (включая исследование мгновенной погрешности по классу 5TPE), исследования частотных характеристик, исследование работы с системами синхронизации времени в различных режимах работы, температурные и вибрационные испытания и т.д. В ходе работ накоплен большой опыт проведения испытаний международного уровня и определены основные «болевые точки» оптических трансформаторов. В частности, обязательными квалификационными испытаниями признаны климатические, на мгновенную погрешность и



Рис. 10. Проведение испытаний на однофазное КЗ (КЕМА)

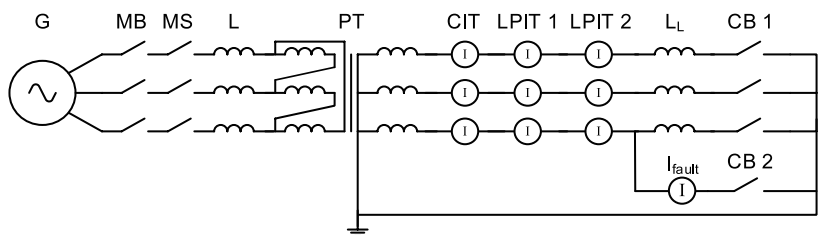


Рис. 11. Электрическая схема испытаний на однофазное КЗ (КЕМА)

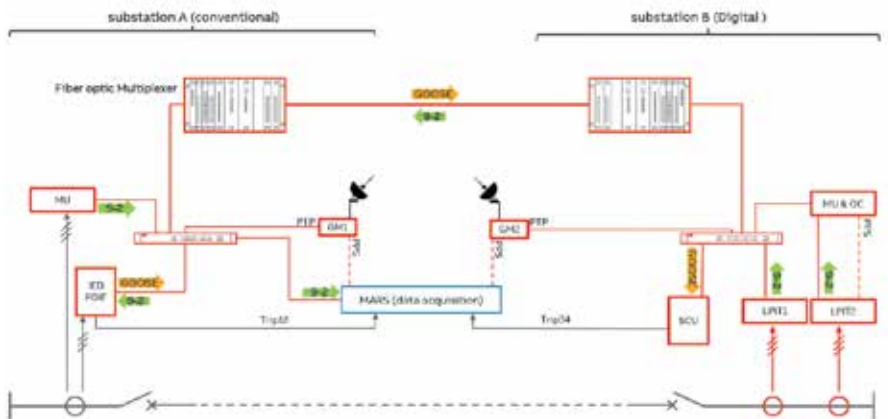


Рис. 12. Структурная схема испытаний на однофазное КЗ (КЕМА)

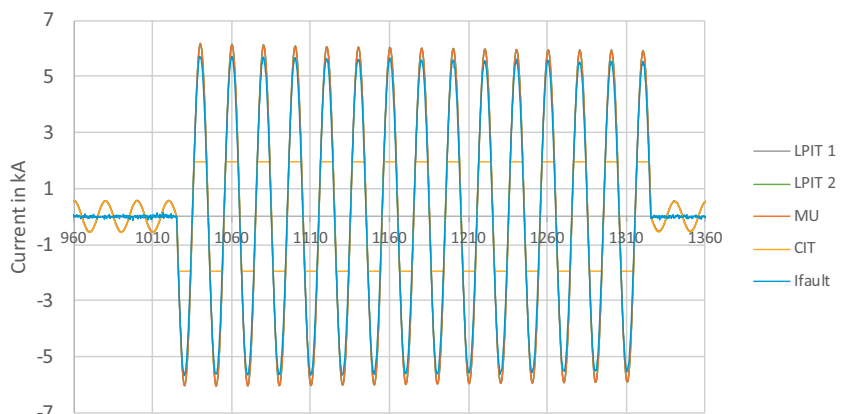


Рис. 13. Опыт проведения измерений при помощи различных ТТ (LPIT1 – ТТЭО Профотек)

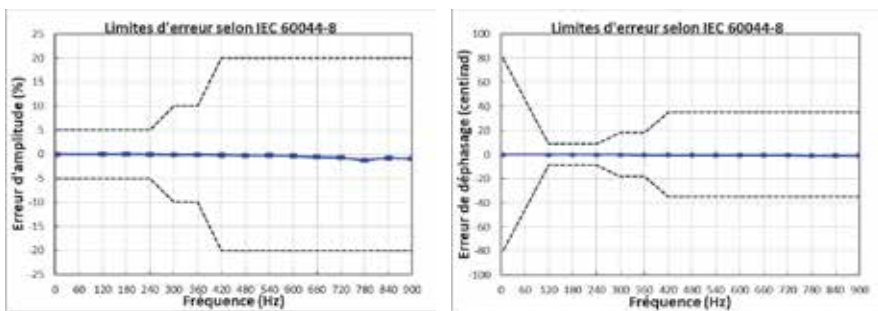


Рис. 14. Графики погрешности

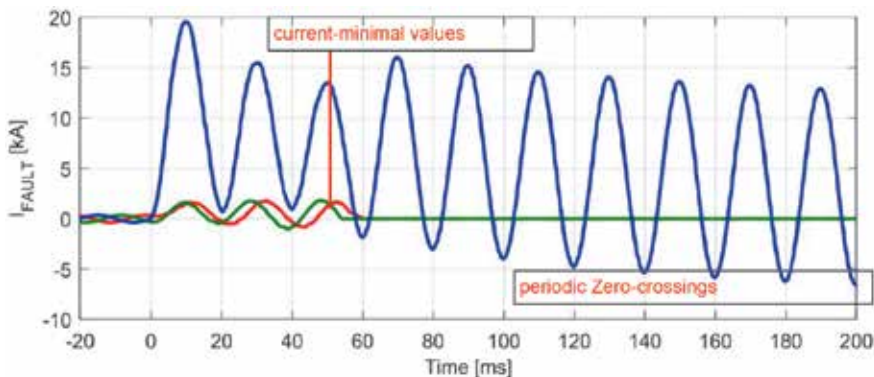


Рис. 15. Пример асимметрии токов КЗ

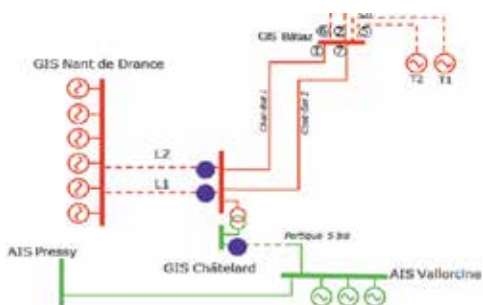


Рис. 16. Точки установки ОТ

на точность пропускания гармонических составляющих (графики погрешности приведены на рис. 14).

Основной вывод: именно на этом пилоте полностью независимо протестирована корректная работа ТТЭО на частоте 60 Гц как базовой для расчета количества сеплов в секунду, и различными комбинациями выдаваемых потоков т.е. фактически подтверждена работа по «Российскому» профилю МЭК 61850-9-2 за год до его

утверждения. Подтверждены натурными испытаниями идеальное воспроизведение гармонического состава измеряемого сигнала вплоть до 1000 Гц (что значительно превышает требования РЗА).

По итогам тестирования трансформаторы «Профотек» были выбраны для реализации пилотного проекта как показавшие наилучшее соответствие требованиям и реально соответствующие декларируемым параметрам.

Летом 2020 года перед отгрузкой готового изделия для прохождения сертификационных испытаний в лаборатории КЕМА в лаборатории Профотек был проведен ряд типовых испытаний по климатике, точности, замене компонентов и безопасности. Испытания проводились при дистанционном участии заказчиков и независимых экспертов, в соответствии с международными требованиями.

Специально для Hydro-Quebec был разработан модуль оцифровки вторичного напряжения от индуктивного трансформатора напряжения. Такое нововведение связано с тем, что в ряде стран (например, в Италии и Канаде) запрещены емкостные трансформаторы для учета. Вместо них используются индуктивные трансформаторы.

### Гидроэлектростанция Nant de Drance (компания Swissgrid, Швейцария)

При реализации данного проекта решалась задача создания системы измерений AC и DC на высоковольтных кабелях трансформаторов гидрогенераторов 220 кВ и 330 кВ, обеспечивающей высокоточные измерения аperiodического тока (рис. 15) в диапазоне от 5 А до 40 кА в условиях возможности работы без пересечения током нуля. Это задача была решена при помощи ОТТ производства Профотек (рис. 16, 17). Успешно проведены квалификационные испытания.

Основной вывод: применение оптических ТТ – единственно возможное решение, гарантирующее динамический диапазон измерений токов в линиях генераторов от минимальных нагрузок до токов короткого замыкания независимо от переходного процесса.

### Подстанция Martigues (компания EDF, Франция)

Задача данного проекта – накопить статистические данные о наработке на отказ трансформаторов компании

Профотек. В связи с тем, что подстанция Martigues расположена на побережье моря, в непосредственной близости от приливной зоны с максимальной солнечной радиацией и соляными туманами. Рядом расположена серия химических заводов, которые сильно загрязняют атмосферу. По подсчетам специалистов EDF, год эксплуатации на данном объекте равен пяти годам эксплуатации в обычных условиях.

В течение 15 месяцев на трансформатор 110 кВ постоянно подавалось повышенное напряжение 145 кВ, подавались токи напряжения, контролировались погрешности. Серия замеров подтвердила, что за 15 месяцев (что соответствует приблизительно шести годам эксплуатации на обычном объекте) никакой деградации приборов не произошло – ни в высоковольтной изоляции, ни в работе. Погрешность осталась в пределах заявленного класса точности 0,2S.

Кроме того, на данном объекте был наработан опыт осуществления монтажа и наладки трансформатора обученными специалистами сторонней компании (партнер Профотек швейцарская компания CONDIS SA), показавший, что при наличии необходимых компетенций и оборудования это не составляет особого труда.

### Создание системы АПВ с применением ОТ Профотек на ПС Герцево 220 кВ (ОЭК, Россия, Москва)

Подстанция 220 кВ «Герцево», расположенная на северо-западе Москвы – самая крупная подстанция АО «ОЭК». Общая установленная мощность трансформаторов составляет 800 МВА, подстанция питает потребителей по 13 отходящим кабельно-воздушным линиям 220 и 110 кВ. Однако в связи с наличием кабельной вставки 220(110) кВ присоединений, отходящих от КРУЭ-220(110) кВ, которая не допускает автоматическое повторное включение, из-за самой конструкции кабеля и практически отсутствия возможности восстановления изоляции при коротком замыкании, в существующей автоматике АПВ не предусматривалось.

АО «ОЭК» решило задачу быстрого восстановления питания потребителей за счет создания системы АПВ КВЛ 220 и 110 кВ на ПС «Герцево» с условием его запрета при всех видах коротких замыканий, выявленных на кабельном участке (селективное АПВ). Главное преимущество



Рис. 17. ОТ Профотек, установленные на высоковольтных кабелях

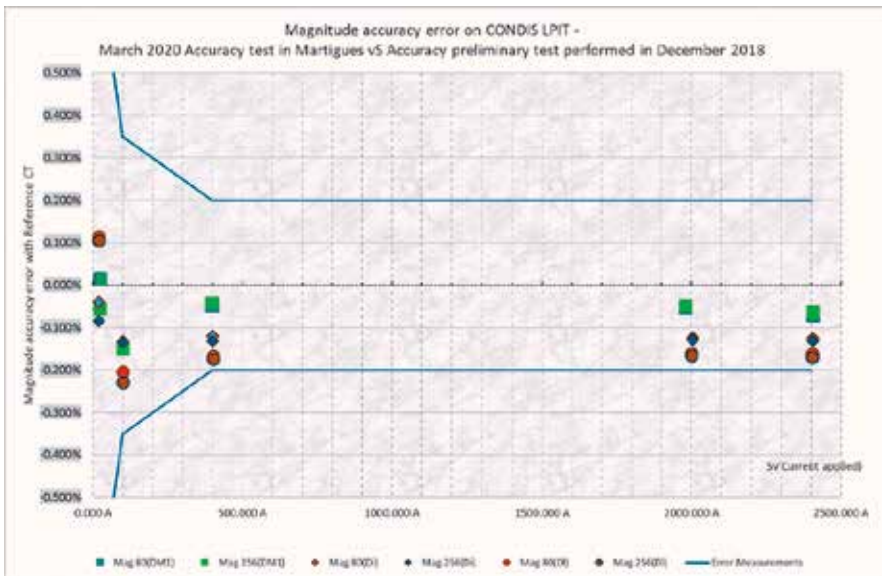


Рис. 18. Комбинированный трансформатор Профотек на ПС Martigues

такого решения – использование в качестве детектирующего органа дифференциальную токовую защиту с тормождением, так как по своему принципу действия ДЗО является защитой абсолютной селективности и 100 % определяет любой вид повреждения внутри защищаемого объекта.

В качестве измерительных трансформаторов для реализации селективного автоматического повторного включения были использованы 13 комплектов гибких оптических трансформаторов тока (ТТЭО-Г) производства АО «Профотек», установленных в основании кабельных муфт на переходных пунктах, располо-





Рис. 19. ОТ Профотек, установленные на кабельных муфтах на ПС Герцево

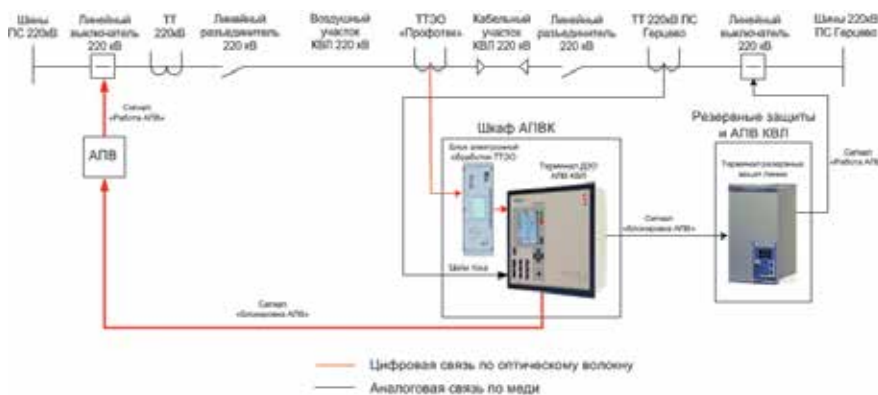


Рис. 20. Принципиальная схема организации АПВ на КВЛ на ПС Герцево

женных на территории ПС «Герцево» для измерения тока в точке перехода кабель-воздушная линия.

Электронно-оптические трансформаторы гибкого исполнения были смонтированы в основании кабельных муфт 110 и 220 кВ на ОРУ без длительных строительно-монтажных работ и демонтажа существующего оборудования и конструкций.

Опыт, полученный при реализации данного объекта, заключался в следующем:

- возможна организация дифференциальной защиты, где с одной стороны стоит ТТЭО, а с другой – аналоговый ТТ;
- отработан монтаж и ПНР на кабельных муфтах без внесения изменений в первичную схему.

**РЕЗЮМЕ**

По итогам выполненных проектов на поставленные вопросы были получены следующие ответы:

**Насколько цифровые трансформаторы тока и напряжения при работе с защитами идентичны классическим в реальной ситуации КЗ или специфических переходных процессов? Ответ:**

- полностью идентичны при работе в простых вариантах защит, используемых в стандартных применениях. Опыт

сравнения показал 100 % совпадение результатов срабатывания традиционных и цифровых терминалов при условии качественной обработки первичного потока 61850-9-2 терминалом.

- при наличии значительных несинусоидальных переходных процессов альтернативы оптическим трансформаторам нет.
- выполненные по стандарту терминалы и оптические трансформаторы взаимозаменяемы в части информационных подсистем и позволяют эксплуатировать системы с разными производителями компонент, тем самым подтверждается основной принцип взаимозаменяемости.
- время срабатывания цифровых защит примерно на 2–5 мс. дольше чем, у классических, т.к. 2 мс. – это время, предусмотренное стандартом на измерение и выдачу пакетов измерений трансформаторами, от 0 до 3 мс. добавляют производители РЗА для дополнительного контроля пришедших выборок. Данное время можно уменьшить путем оптимизации алгоритмов РЗА с учетом особенностей работы оптических трансформаторов. Пока можно констатировать факт того, что алгоритмы терминалов аналоговых и цифровых версий практически идентичны и в полной мере преимущества класса точности 5TRPE не реализуют.

**Какие моменты эксплуатации являются критическими для функционирования ЦПС? Ответ:**

- система передачи данных. Неправильно настроенная или некорректно работающая шина процесса способна приводить к ложным выводам защит из работы и переполнением буферов событий. Необходимо на уровне SCADA подстанции или вспомогательных подсистем анализировать показатели сети передачи данных для выявления сбоев, а также – контролировать топологию сети по таблицам разрешенной маршрутизации пакетов;
- работа системы синхронизации времени. Вторая по объему тестирования при ПНР и первая по количеству причин сбоев болевая точка. Необходимо намного больше внимания уделять тестированию серверов времени в различных режимах – работа по PRP, потеря и восстановление связи со спутниками, VMCA и т.д. По сравнению с объемом внимания, уделяемого работе электронных трансформаторов и терминалов РЗА серверам времени выделено ничтожно малое количество. Опыт всех пилотных проектов реальных подстанций показал наличие огромного пласта неидентифицированных проблем по причине именно поведения серверов времени. Специально ради исключения таких сбоев во встроенное ПО трансформаторов добавлены функции контроля доверия серверам времени и отложенные реакции на внезапные изменения параметров если «вдруг» источник времени через пару секунд передумает резко изменять шкалу времени. Количество «выбросов», регистрируемых из-за резкого изменения времени сервером после установки таких защит, снизилось практически до нуля и специально введенные журналы событий контроля внешних подсистем регулярно фиксируют случаи неадекватного поведения системы времени;
- электромагнитная совместимость. Особо стоит отметить, что опыт эксплуатации в сложных условиях электромагнитной обстановки (ПС 500кВ Тобол, ПС 110 кВ Десна и Уват, Испытательный центр ВЭИ, Испытательный центр КЕМА) показали, что приведенные в стандартах ГОСТ Р МЭК 60044 уровни ЭМС недостаточны и должны быть увеличены практически до максимальных;

■ следует в обязательном порядке делать испытания терминалов на правильность присвоения меток времени в COMTRADE и алгоритмах по аналоговым, цифровым и бинарным входам. Практика показала, что терминалы правильно обрабатывают по алгоритмам, но далеко не все терминалы могут корректно записать все во встроенный РАС, ошибки присвоения времени бывают до нескольких десятков градусов, как в одну, так и в другую сторону.

**Каким образом достичь наиболее эффективного соотношения цена/качество при реализации ЦПС и как выбрать по максимуму преимущества ЦПС? Ответ:**

■ перейти от классических понятий ядер ТТ/ТН для коммерческого учета и РЗА к понятию унифицированного ядра, когда один и тот же цифровой поток данных соответствует одновременно классу точности КУ и классу точности РЗА для переходных процессов. Данное обстоятельство позволяет снизить себестоимость электронных трансформаторов сразу на 20% по отношению к решениям, реализованным в прошлые годы (вместо 3х электронных блоков достаточно только двух – основного и резервного, как следствие – снижение стоимости, места в ячейках, потребления от СОПТ и т.д.). Как бонус – в данном случае имеется возможность реализации бесшовного резервирования коммерческого учета при подписке счетчика одновременно на основной и резервный потоки;

■ перейти к широкодиапазонным трансформаторам тока, когда один и тот же трансформатор может закрывать целый диапазон номинальных токов. Такой принцип заложен в унифицированных классах точности 1И, 2И, 1Р, 2Р СТО ПАО «Россети». Данный подход упрощает проектирование, снижает количество ЗиП в целом по сетям и приводит к снижению себестоимости за счет снижения номенклатуры выпускаемых изделий производителем;

■ оптимизировать терминалы РЗА для снижения их номенклатуры и сделав более эффективные алгоритмы с учетом отсутствия намагничивания ТТ.

**Как правильно проводить испытания цифровых трансформаторов и цифровых защит, чтобы убедиться в надежности проектируемого решения? Ответ:**

■ практически все испытания должны проводиться при включенном состоянии трансформаторов с контролем работы электроники. В первую очередь это касается высоковольтных испытаний, вибрации и испытаний ЭМС. То, что для классических трансформаторов было достаточно критерия сломался/нет, то для электронных важно поведение устройства во время испытаний;

■ устройства, имеющие медные входные контакты (например, с разъемами RJ45) должны испытываться на ЭМС с подключенными кабелями стандартной длины, что существенно изменяет их устойчивость к помехам;

■ климатические испытания должны проводиться в полном объеме включая холодный старт, узлы отбора мощности от сети (если такие есть) должны подвергаться испытанию одновременно с основным изделием и находиться в тех же условиях;

■ особое внимание следует обращать на работу устройств в условиях различного поведения серверов времени;

■ терминалы РЗА должны в обязательном порядке иметь детальную диагностику в COMTRADE по статусу синхронизации потоков и битовым маскам качества получаемых замеров;

■ крайне рекомендуется иметь предварительный протокол детальных испытаний на совместимость конкретного типа трансформаторов с конкретным типом терминала. На текущем этапе все производители активно дорабатывают технологию с учетом накапливаемого опыта и в неоднозначно описанных случаях возможны несовпадения логики работы приборов.

## ВЫВОДЫ

1. Технология ЦПС, построенная на применении оптических трансформаторов тока, является наиболее востребованной в мире, так как позволяет реализовать ранее недоступные возможности алгоритмов обеспечивая 100 % соответствие с теорией вне зависимости от исходного состояния трансформатора.

2. ЦПС – комплексное решение, каждый компонент которого должен всесторонне изучаться и детально тестироваться.

3. Должны быть разработаны адекватные требования к работе систем синхронизации времени и проведены испы-

тания применяемых серверов времени на соответствие предъявляемым требованиям.

4. Учитывая существенный достигнутый прогресс в оптимизации программно-аппаратной базы электронных трансформаторов и терминалов РЗА, рекомендуется реализация ряда пилотных проектов на новейшей аппаратной базе. Опыт, накопленный на пилотных проектах, следует использовать при составлении программ квалификационных испытаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. CESI report prot. B6001763 – “Prove di interoperabilità su sensori ottici di Alta Tensione – Fase 1 – Definizione delle procedure di prova per la verifica dell’interoperabilità di TA Ottici e protezioni di differenti costruttori” – May 2019.

2. CESI report prot. B9009819 – “Prove di interoperabilità su sensori ottici di Alta Tensione – Fase 2 – Descrizione del circuito di prova per la verifica dell’interoperabilità di TA Ottici e protezioni di differenti costruttori” – September 2019.

3. CESI report prot. B9018829 – “Interoperability tests with HV Optical Sensors Part 3: First configuration test results (Condis-Profotech)” – December 2019.

4. IREQ. Rapport d’essais. Résultats de tests TCO MAXWELL/CONDIS EFOCT Novembre 2017.

5. IEC 60255-121 International Standard – “Measuring relays and protection equipment – Part 121: Functional requirements for distance protection” – Edition 1.0 2014-03

6. T. Heid, T. Neumeier, F. Renaud, M.D. Vo, M. Yanin. “Monitoring of asymmetric short circuit currents at a hydro power plant using electronic fibre optical current transformers” CIGRE Session 2020, paper A3-223.

7. T. Heid, B. Paya, L. Basuyaux, M.D. Vo, M. Yanin. “Accuracy study of a combined low-power instrument transformer in different climatic and pollution conditions” CIGRE Session 2020, paper A3-224.

8. Янин М.А., Шеметов А.С., Козырев А.В., Канафеев Р.И., Иванов Н.А. «Текущие результаты опытной эксплуатации электронных ТТ и ТН 500 кВ». Энергоэксперт, № 1 – 2020.

9. Янин М.А., Канафеев Р.И., Иванов Н.А., Шеметов А.С., Козырев А.В., Антипин В.С. «Сравнение работы цифровых и аналоговых ТТ и ТН при опыте однофазного КЗ на ЦПС 500 КВ Тобол». Релейщик, № 03 – 2020.