

# Построение систем РЗА и АИИС КУЭ на базе оптических трансформаторов тока и напряжения с цифровым интерфейсом

**В данной статье вы найдете ответы на следующие вопросы:**

- Каковы основные преимущества систем РЗА и АИИС КУЭ, использующих оптические трансформаторы тока и напряжения?
- Каковы результаты исследования совместной работы устройств защиты с оптическими трансформаторами тока и напряжения?

## Авторы

Власов М. А.  
Воронков М. В.  
Малков Б. Б.  
Сердцев А. А.

**М**еждународный стандарт МЭК 61850 для систем связи внутри подстанций открывает новую эру в построении подстанций. Он влияет не только на проектные решения по защите, контролю и управлению подстанцией, но также затрагивает и технические решения по формированию вторичных цепей подстанции.

За последние несколько лет повышенная заинтересованность к новому международному стандарту МЭК 61850 была очевидна как со стороны производителей оборудования, так и со стороны заказчиков. Основная цель стандарта – обеспечение в пределах одной подстанции полной функциональной совместимости интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) различных производителей.

Этот подход в значительной степени был сконцентрирован на вопросах реализации станционной шины МЭК 61850-8-1, моделирующей и совершенствующей традиционные подходы SCADA и заменяющей обмен сигналами между устройствами защиты и управления подстанции при использовании электрических кабельных связей на обмен GOOSE-сообщениями. Тем не менее, станционная шина – только часть направлений развития решений, предлагаемых стандартом МЭК 61850.

Часть стандарта МЭК 61850-9-2, оставшаяся до настоящего времени в значительной степени неис-

следованной, описывает способы взаимодействия с электронными измерительными трансформаторами, работающими на основе нетрадиционных, например, оптических технологий, в которых устранены ограничения, свойственные традиционным электромагнитным трансформаторам тока и напряжения.

У оптических решений есть ряд присущих им достоинств, как, например, отсутствие переходных процессов, повышение точности и эксплуатационной безопасности. Более чем 15 лет перспективных исследований и реализованных проектов по всему миру доказывают огромный потенциал этой технологии.

Наибольших успехов в создании оптических трансформаторов достигла компания NxtPhase T&D, объединившая в одно такие направления, как волоконно-оптические измерения, цифровую обработку сигналов и разработку программного обеспечения. Серийно выпускаются высоковольтные оптические измерительные трансформаторы тока NXCT, высоковольтные трансформаторы напряжения NXVT, комбинированные трансформаторы тока и напряжения NXVCT и трансформируемые измерительные оптические преобразователи тока NXCT-F3. Оптические трансформаторы относятся к классу электронных трансформаторов, требования к которым сформулированы в международных стандартах [1, 2].

Высоковольтные оптические трансформаторы (рис. 1) состоят из изоляционной колонны с установленными на ней датчиками тока и напряжения и комплекта электроники, размещаемого в стандартной 19" стойке.

В верхней части колонны трансформаторов тока расположен датчик, выполненный в виде полого кольца с расположенными внутри несколькими витками измерительного оптического волокна, огибающими шинопровод с током (рис. 2). При протекании тока вокруг проводника возникает магнитное поле, которое оказывает влияние на поляризацию двух поляризованных световых сигналах с противоположным направлением вращения, проходящим по измерительному волокну. Изменение поляризации вернувшихся световых сигналов позволяет вычислить угол Фарадея, который прямо пропорционален току в первичной цепи. Запатентованный оптический фазовый модулятор, являющийся основой технологии измерения датчиков тока NxtPhase, обеспечивает возможность измерения тока с высокой точностью. Конструкция датчиков отличается повышенной чувствительностью и универсальностью по сравнению с технологией датчиков тока с «объемной оптикой», использующей для охвата токнесущего проводника монокристалл.

В трансформаторах напряжения NxtPhase внутри колонны устанавливаются электрооптические ячейки на основе германата висмута, использующие эффект Поккельса, заключающийся в изменении преломления показателя света в кристаллах, помещенных в электрическое поле, и пропорциональный напряженности электрического поля. Величина напряжения вычисляется на основе взвешенной суммы значений, измеренных несколькими датчиками, установленными в определенных точках изоляционной колонны. Это позволяет выполнить измерение напряжения с высокой точностью, не зависящей от температуры, вибраций и факторов, искажающих электрическое поле: загрязнение, геометрия оборудования или влияние расположенных рядом фаз.

Конструкция датчиков тока и напряжения основана на пассивных оптических компонентах, никаких других измерительных элементов, кроме оптического волокна и ячеек Поккельса в колонне, не присутствует. Оптические волокна от датчиков, проходя через полимерный изолятор, выводятся в основание колонны и кроссируются к оптическому фидерному кабелю.

Вся обработка сигналов проводится в блоках электроники, соединенных с колоннами магистральным оптическим кабелем. В состав электроники входит электронно-оптический блок и блоки усилителей тока и напряжения. Усилители в соответствии со стандартами IEEE и МЭК имеют выходы для приложений коммерческого учета с номинальным током 1 А и на-

пряжением  $100 / \sqrt{3}$  В. На задней панели электронно-оптического блока (рис. 3) выведены оптические разъемы для подключения к технологической шине МЭК 61850-9-2 и шине сигналов синхронизации 1PPS. Для приложений защиты цифровой интерфейс посылает 80 наборов с отсчетами дискретных значений на период питающей сети. В этот набор данных входят данные параметров трехфазного напряжения, напряжения шины, напряжения нейтрали, трехфазных токов для защиты и измерения. Для приложений учета, контроля качества электроэнергии и осциллографирования в одном кадре Ethernet передаются 8 наборов данных с частотой 256 отсчетов на период.

За последние несколько десятилетий совершенствование технологий и улучшение оптических датчиков привели к появлению на рынке оптических преобразователей тока и напряжения. Однако они не были широко приняты проектными, строительными и эксплуатационными организациями, поскольку их вторичные выходы не обеспечивают мощность, необходимую для устройств защиты с аналоговыми входами, и было немного электросчетчиков или терминалов релейной защиты с цифровыми интерфейсами из-за отсутствия стандартного протокола цифровой коммуникации. Принятие стандарта МЭК 61850 и появление на рынке счетчиков и устройств релейной защиты с цифровыми входами открывает пути к созданию полностью цифровой системы защиты и измерения.

Так как новая полностью цифровая система, скопированная из ИЭУ от различных производителей, до сих пор практически никогда не реализовывалась или не тестировалась, необходимо было определить ее рабочие характеристики. Для подтверждения совместимости и интероперабельности оборудования Проектно-исследовательским центром энергосистем (PSERC) была выполнена работа под названием «Система цифровой защиты с использованием оптических измерительных трансформаторов и цифровых устройств релейной защиты, объединенных вместе с помощью цифровой технологической шины МЭК 61850-9-2 [3,4]. Промышленными консультантами при утверждении работы были представители от компаний ABB, American Electric Power, AREVA T&D, EPRI, GE, NxtPhase, TVA, Tri-State.

Исследование совместимости и интероперабельности полностью цифровой системы защиты пред-



Рис. 1

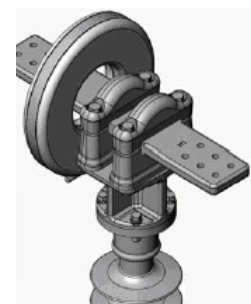


Рис. 2



Рис. 3

**Власов М. А.** – генеральный директор, **Воронков М. В.** – коммерческий директор, **Малков Б. Б.** – начальник технического отдела, **Сердцев А. А.** – технический директор, ООО «ПроЛайн».

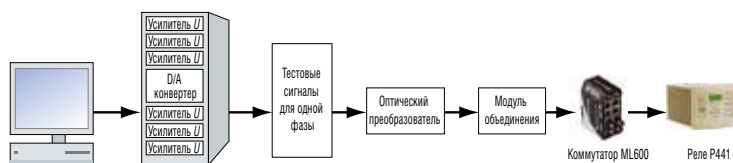


Рис. 4. Схема испытательной установки

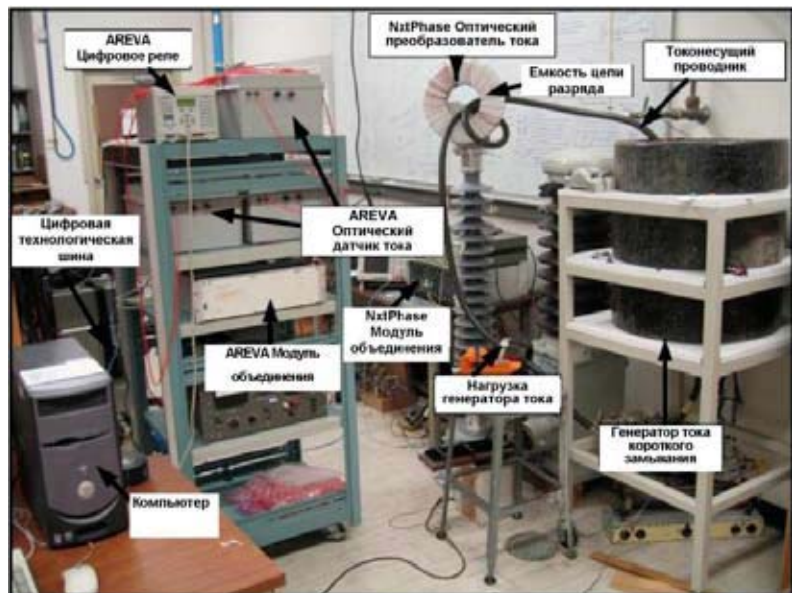


Рис. 5. Испытательная установка формирования токов короткого замыкания

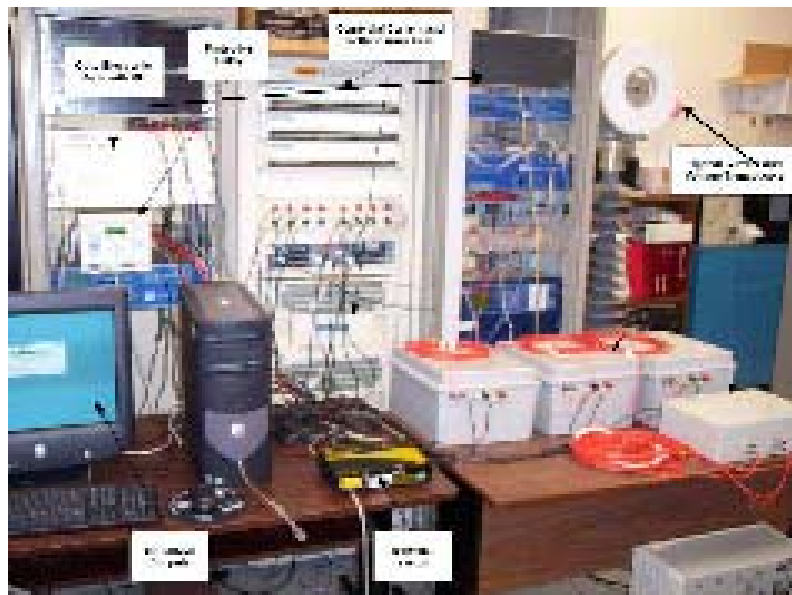


Рис. 6. Испытательная установка тестирования системы защиты

полагает два вида испытания – испытания на соответствие техническим требованиям и испытания для определения рабочих характеристик. Часть стандарта МЭК 61850-10 дает руководящие указания для проверки на совместимость интеллектуальных электронных устройств, объединенных в полностью цифровой системе защиты. Испытания в рабочих условиях предоставляют возможность получения расширенной оценки и могут быть использованы для определения рабочих характеристик комплексной системы, включая проверку поведения систем защиты, точности и времени их срабатывания при различных сценариях моделирования, соответствующих различным условиям, происходящим в энергосистеме.

В соответствии с разработанной методикой показатели совместимости рассчитывались исходя из анализа выходных сигналов ИЭУ, объединенных в единый испытательный комплекс. Общая схема установки показана на рис. 4.

Лаборатория высокого напряжения Университета штата Аризона (ASU) разработала синхронный генератор высокого напряжения и тока для моделирования реальных напряжений и токов при коротком замыкании в генераторе. Моделируемые сигналы высокого напряжения и тока прикладывались к оптическим измерительным трансформаторам тока и напряжения. Вся цифровая система максимальной токовой защиты была испытана в режиме с обратнoзависимой характеристикой выдержки времени с реальными значениями больших токов, прикладываемых к первичной стороне оптического трансформатора тока. На рис. 5 и 6 приведены фотографии испытательного комплекса.

Однофазный трансформатор тока NXCT подключался к модулю объединения, формировавшему на выходе дискретные значения сигнала в цифровом формате в соответствии со стандартом МЭК 61850 9 2. Модуль объединения был подключен к Ethernet коммутатору ML600, переславшему измеренные данные к терминалу релейной защиты AREVA MICOM P441.

Передача информации между трансформатором тока и модулем объединения осуществлялась по волоконно-оптическому кабелю. Обмен информацией между модулем объединения, коммутатором и терминалом защиты был организован через медный кабель по протоколу МЭК 61850-9-2.

В общей сложности 120 различных воздействий (1200 испытания, каждое воздействие воспроизведено 10 раз) созданы при тестировании защитного комплекса. Во время испытаний несколько модулей объединения были подключены к сети Ethernet, но только для одного устанавливался адрес получателя, соответствующий адресу терминала релейной защиты. Кроме того, для моделирования высокого уровня сетевого трафика на технологической шине использовался ПК, подключенный к той же самой сети, генерировавший случайные пакеты данных со скоростью, равной тысяча 1,5-Кбайтных пакетов в секунду.

Следующие выводы были сделаны, на основе полученных результатов [3,4]:

- Селективность функции максимальной токовой защиты для испытанной цифровой системы защиты соответствует рассчитанным значениям.
- Сравнение усредненных времен отключения показывает, что для всех моделируемых типов короткого замыкания, время срабатывания подвергнутых испытаниям систем сопоставимо.
- Средние значения для среднеквадратичного отклонения показывают, что есть высокая степень достоверности того, что для испытанной системы цифровой защиты время срабатывания при любом конкретном повреждении будет определяться времятоковой характеристикой срабатывания с почти пренебрежимо малым уровнем разброса от среднего времени отключения – 2 миллисекунды.
- Ток постоянного смещения не влияет на время отключения.
- Ток нагрузки и импульсные токи малой длительности не приводят к формированию сигналов на отключение.
- Общие рабочие характеристики системы защиты весьма незначительно зависят от обмена данными через Ethernet коммутатор при номинальном уровне информационного трафика на технологической шине.

В целом анализ результатов испытаний показал, что рабочие характеристики полностью цифровой системы по выполнению функций направленной максимальной токовой защиты могут быть оценены как отличные, и предоставленные компанией NxtPhase трансформатор тока и компанией AREVA цифровой терминал релейной защиты, доказали хорошие показатели совместимости и interoperабельности.

Из физической основы оптических трансформаторов вытекают их основные преимущества перед электромагнитными трансформаторами напряжения и тока.

Первый очень важный – отсутствие у оптических трансформаторов тока явления насыщения, гистерезиса, остаточных необратимых изменений параметров после перегрузки. Ферромагнитный сердечник электромагнитного трансформатора тока в схемах релейной защиты нередко оказывается сильно насыщенным, и вследствие этого форма кривой вторичного тока оказывается в значительной степени искаженной. На рис. 7 показан промасштабированный график сигнала на выходе трансформатора при его насы-

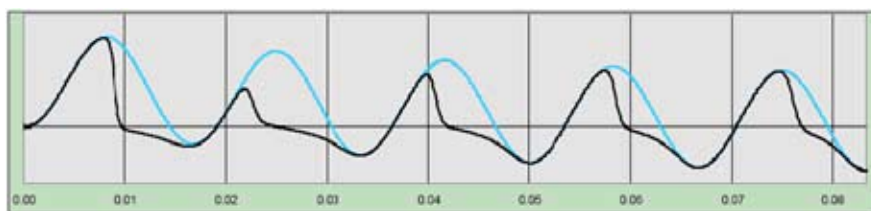


Рис. 7. Выходной сигнал традиционного измерительного трансформатора в сравнении с током в первичной цепи

щении апериодической составляющей тока короткого замыкания и реальное значение тока в первичной цепи.

С учетом того факта, что расчетным режимом работы трансформатора тока в схеме релейной защиты иногда является не установившийся, а переходный режим, искажения сигнала от датчиков, при недостаточно эффективной обработке в терминале, приводят к ее отказу, либо к ложной работе системы защиты. Это, в свою очередь, может повлечь за собой серьезное повреждение оборудования, либо необоснованное отключение потребителей электроэнергии.

Прекрасно осознавая неизбежность насыщения трансформаторов тока, производители устройств РЗА разрабатывают различные алгоритмы цифровой обработки сигналов, поступающих в терминал защиты, с целью улучшения показателей быстродействия, чувствительности, селективности и надежности распознавания аварийных ситуаций в электрических сетях. Как правило, данные алгоритмы обладают значительными погрешностями в переходных процессах аварийных режимов и не обеспечивают должной точности срабатывания.

Современные оптические трансформаторы тока NXCT, не имеющие магнитных компонентов и проблем, связанных с эффектом насыщения, обладают рабочими характеристиками, значительно превышающими свойства электромагнитных трансформаторов. Широкая полоса пропускания и расширенный динамический диапазон позволяют трансформаторам NXCT точно воспроизводить сигналы сложной формы, возникающие, например, при коротких замыканиях, предоставляя реальные значения переменных и постоянных составляющих первичного тока.

Так, например, оптический трансформатор с номинальным током 2000 А, испытанный с полностью смещенным в положительную область апериодическим токовым сигналом с пиковым значением 108 кА (40 кА<sub>RMS</sub>), обеспечивает погрешность передачи сигнала в сравнении с эталонным резистивным шунтом меньше, чем 2 % (Рис. 8).

Другое преимущество оптических трансформаторов – широкий динамический диапазон измерений в сочетании с высокой линейностью и расширенной полосой пропускания. Вместе с тем, использование оптических трансформаторов тока и напряжения при создании систем АИИС КУЭ позволяет повысить точность измерений вследствие частичного или полного исключения потерь во вторичных цепях трансформаторов. На рис. 9 представлена структура и значения погрешностей измерительной системы на базе традиционных трансформаторов.

При использовании оптических трансформаторов с аналоговым выходом устраняются погрешности, связанные с нагрузочными характеристиками трансформаторов, и в значительной степени уменьшаются погрешности из-за потерь во вторичных цепях напряжения, поскольку передача измерительной информации от первичных датчиков производится по оптическому волокну, и недоучет по этой причине, в силу малой длины вторичных цепей, исключается.

Применение цифрового интерфейса для передачи измеренных значений тока и напряжения от оптических трансформаторов к счетчику с цифровым измерительным входом позволяет дополнительно снизить погрешность измерительного комплекса.

Оптические преобразователи тока имеют метрологические характеристики в широком диапазоне токов от 0,1% до 200% и допускают перенастройку пользователем коэффициентов трансформации по току и напряжению. При этом один и тот же трансформатор может использоваться как для номинальных токов 100 А, так и 1000 А.

Отличительным признаком оптических трансформаторов является высокая стабильность выходных нагрузочных характеристик усилителей тока и напряжения. Это позволяет подключать к их выходу усилителя напряжения измерительные приборы с мощностью потребления по фазе в диапазоне от 0 до 2,5 ВА, а для усилителя тока сопротивление нагрузки может составлять величину в пределах от 0 Ом до 3 Ом.

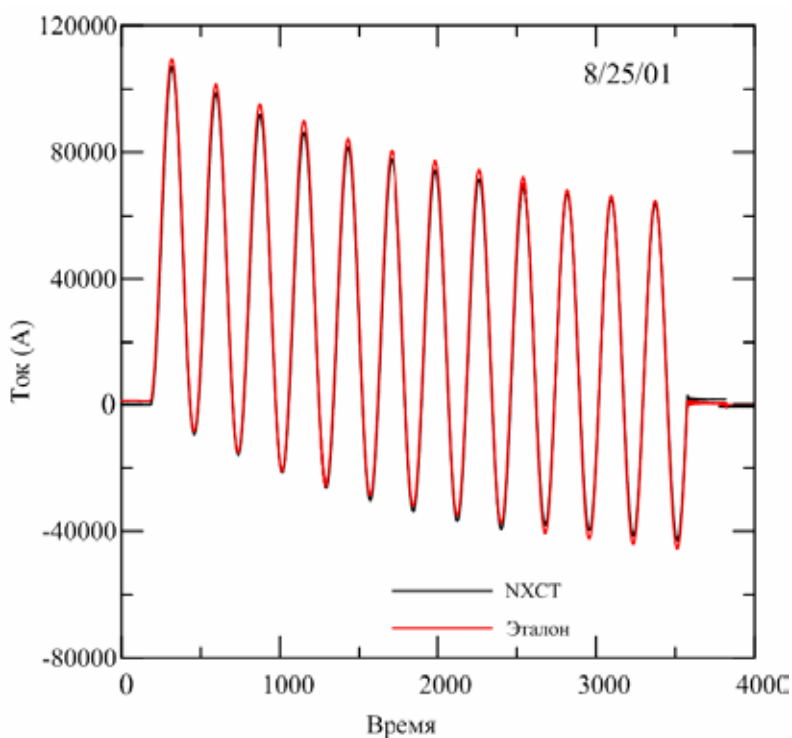


Рис. 8. Сравнение переходных характеристик оптического трансформатора тока с напряжением на эталонном резистивном шунте

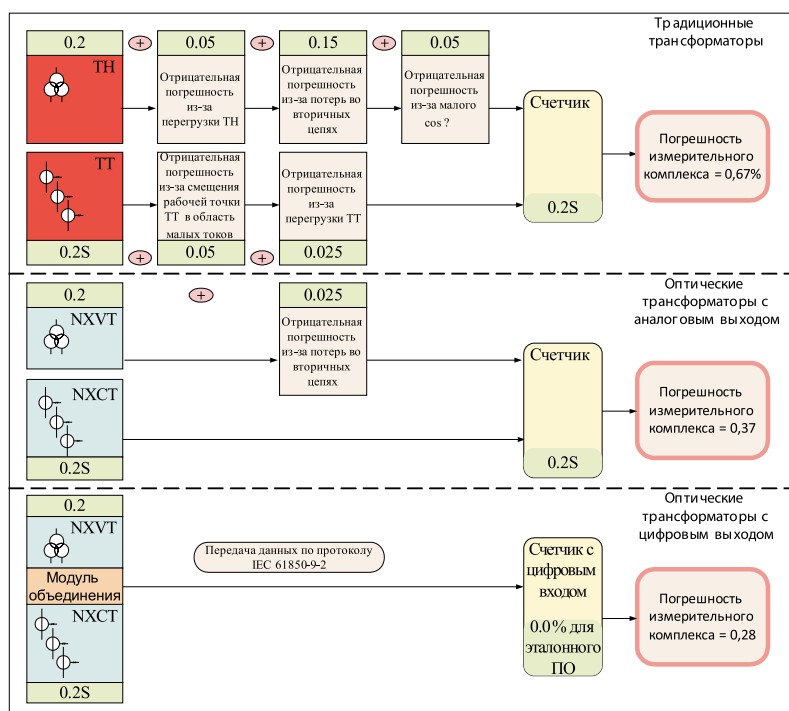



Рис. 9. Структура погрешностей измерительного комплекса на базе традиционных и оптических трансформаторов

Кроме того, оптические измерительные трансформаторы, имея полосу пропускания в диапазоне от 30 Гц до 5 кГц, предоставляют возможность оценки до 100 гармонических составляющих напряжения и тока, что полностью соответствует всем требованиям действующих и перспективных стандартов по измерению качества электрической энергии.

Одним из важных преимуществ оптических трансформаторов тока является повышение эксплуатационной безопасности на подстанции, базирующееся на высокой термической и электродинамической стойкости оптических датчиков, отсутствии в изоляторе масла, бумаги или элегаза, исключение проблем, связанных с феррорезонансом и опасностью размыкания вторичных токовых цепей.

В январе 2006 года в России установлены и запущены в эксплуатацию первые две трехфазные комбинированные системы оптических трансформаторов на напряжение 220 кВ на одном из ведомственных объектов в Вологодской области. Работы проводились при температурах ниже минус 15 °С. Основное отличие от монтажа традиционных трансформаторов – это использование оборудования для сварки оптоволокон. Установка выполнена успешно, и в настоящее время оптические трансформаторы функционируют параллельно с традиционными электромагнитными трансформаторами (ТГФ 220, НАМИ 220), что создает уникальные возможности для проведения дальнейших исследований. 

### Выводы

Оптические трансформаторы с цифровыми интерфейсами МЭК 61850-9-2 являются качественно новым и перспективным видом оборудования для высоковольтных приложений в энергетике. Проведенные лабораторные исследования и реализованные проекты доказали их технические возможности и повысили доверие к «защите на основе технологической шины». Использование этого высокотехнологичного оборудования при реализации проектов для объектов нового строительства, реконструкции и расширении действующих объектов открывает новые возможности в создании современных автоматизированных полностью цифровых систем подстанций.

### Литература

1. IEC 60044-7, Instrument transformers – Part 7: Electronic voltage transformer.
2. IEC 60044-8, Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformer.
3. M. Kezunovic, George G. Karady, «Digital Protection System Using Optical Instrument Transformers and Digital Relays Interconnected by an IEC 61850-9-2 Digital Process Bus», January, 2008.
4. Z. Djekic, L. Portillo, M. Kezunovic, «Compatibility and Interoperability Evaluation of All-Digital Protection Systems Based on IEC 61850-9-2 Communication Standard», IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, July, 2008.