

Семенкова Надежда Евгеньевна, магистрант, Амурский государственный университет, г. Благовещенск

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В
ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПОДСТАНЦИЯХ**

Аннотация. В статье рассматриваются современные цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения (ЦТТН), их архитектура, преимущества по сравнению с традиционными аналоговыми устройствами и влияние на автоматизацию подстанций. Приведен обзор технических характеристик цифровых трансформаторов, анализируются стандарты, регулирующие их применение, а также обзор рынка и примеры внедрения от российских производителей. Рассмотренные источники подтверждают, что переход на цифровые преобразователи усиливает метрологические свойства систем учета и защиты, повышает надежность и уменьшает объем вторичных соединений.

Annotation. The article considers modern digital current and voltage measuring transformers (TTN), their architecture, advantages over traditional analog devices and influence on automation of substations. The technical characteristics of digital transformers are reviewed, standards regulating their use are analyzed, as well as a market review and examples of implementation from Russian manufacturers. The sources reviewed confirm that the transition to digital converters enhances the metrological properties of accounting and protection systems, increases reliability and reduces the amount of secondary connections.

Ключевые слова: цифровые трансформаторы тока и напряжения, ЦТТН, высокоавтоматизированная подстанция, автоматизация подстанций, стандарт IEC 61850.

Keywords: Digital current and voltage transformers, TTC, high-automation substation, substation automation, IEC 61850 standard.

1. Цифровые измерительные трансформаторы: принципы работы и преимущества

Цифровые трансформаторы тока (ЦТТ) и напряжения (ЦТН) представляют собой электронные измерительные устройства, преобразующие измеряемые ток и напряжение в цифровой поток данных. В отличие от традиционных индуктивных трансформаторов с железными сердечниками, ЦТТ/ЦТН используют активные сенсоры (например, катушки Роговского, резистивно-емкостные делители и малогабаритные ТТ) и встроенные аналого-цифровые преобразователи [5]. На первичной стороне такие трансформаторы содержат высоковольтные делители (для напряжения) и комбинацию сенсоров (для тока), после чего электроника на месте преобразует сигналы в цифровую форму и передает их по оптическому кабелю. По протоколу IEC 61850-9-2 («Sampled Values») преобразованные данные передаются на устройства РЗА, АСУТП и учёта [1].

Основные преимущества ЦТТ/ЦТН по сравнению с традиционными ТТ/ТН заключаются в следующем:

- Лучшие метрологические характеристики: высокая точность измерений, широкий частотный диапазон и возможность работы с несимметричными и апериодическими составляющими тока [1].
- Повышенная помехоустойчивость: электронная обработка сигнала снижает влияние внешних помех и искажений;
- Возможность мониторинга состояния: хранение внутри устройства калибровочных коэффициентов и параметров датчиков позволяет контролировать их состояние и проводить самодиагностику;
- Компактность и легкость: отсутствие массивных медных вторичных обмоток и железного сердечника существенно снижает массу и габариты оборудования [6].

Дополнительные достоинства отмечают и зарубежные эксперты. Так, в анализе технологий МЭК 61850 подчеркивается широкий динамический

диапазон измерений с отсутствием эффекта насыщения и отсутствие феррорезонансных явлений. Это обусловлено тем, что активный сенсор не имеет магнитного сердечника, что исключает ограничение линейности при больших токах. Таким образом, цифровые измерительные трансформаторы обеспечивают существенный технологический рывок в построении «цифровых подстанций» – они позволяют заменить протяженные цепи медных проводов на оптоволоконные каналы и существенно расширить объем передаваемой информации [2].

2. Технические характеристики и конструкция ЦТТН

Конструктивно ЦТТН состоят из набора первичных преобразователей и электронных блоков. Так, на стороне высокого напряжения устанавливаются делители напряжения для ЦТН и комбинация датчиков тока: малогабаритный ТТ для коммерческого учета, пояс Роговского для релейной защиты и автоматики и датчик постоянного тока. Вторичные обмотки традиционных электромагнитных ТТ, заменены на интегральные схемы, формирующие цифровые потоки. Электроника преобразует выходные сигналы в цифровой код и передает пакеты по стандартному протоколу обмена МЭК 61850-9-2 на устройства релейной защиты, автоматики и системы учета. На выходе ЦТТН формируется несколько потоков измерений мгновенных значений тока и напряжения: с частотой дискретизации около 4000 Гц (80 отсчетов в период 50 Гц) для защитных устройств и 12800 Гц (256 отсчетов) для устройств учета. Такие высокоскоростные выборки обеспечивают сохранение формы сигнала и учет высокочастотных составляющих тока и напряжения [5].

Точность цифровых трансформаторов обычно соответствует современным требованиям: они могут обеспечивать классы точности (по току и напряжению) не ниже 0.2, 0.5, 1, 3 и т.д. Однако, благодаря цифровой обработке допускается более стабильная погрешность в переходных и нестационарных режимах [5].

Также преимуществами цифровых трансформаторов тока и напряжения перед традиционными являются значительно меньшие размеры, за счет

компактности датчиков и отсутствия массивных обмоток, а также возможность мониторинга состояния ЦТТН, что позволит вовремя реагировать на неисправности в измерительных цепях.

Благодаря цифровой архитектуре ЦТТН не требуется заранее задавать технические данные, как для обычных ТТ и ТН – формирование сигнала происходит с помощью оцифровки, что упрощает проектирование систем и уменьшает количество параметров, требуемых от проектировщиков.

3. Влияние на эффективность работы и автоматизацию подстанций

Внедрение цифровых трансформаторов на подстанциях приводит к значительному повышению эффективности и автоматизации работы РЗА и АСУ. Во-первых, за счёт цифровой связи устраняются протяжённые соединительные кабели между трансформаторами и шкафами защиты. Это снижает капитальные затраты, уменьшает вероятность ошибок при монтаже и повышает надёжность – оптоволокно не подвержено помехам от ЭМП и не нагружается током короткого замыкания. Во-вторых, цифровые схемы позволяют интегрировать больше информации о режиме подстанции в единую систему. Устройства получают мгновенные данные о формах токов и напряжений без дополнительных датчиков, что расширяет функционал защит (например, гармонические, поперечные токи) и даёт точные измерения при сложных аварийных режимах.

Помимо этого, цифровые трансформаторы упрощают калибровку и обслуживание оборудования. Поскольку калибровочные коэффициенты хранятся внутри устройства, отпадает необходимость периодически перенастраивать трансформатор – достаточно загрузить новые значения через программный интерфейс. Это даёт возможность удалённой настройки систем измерений и сокращает время простоя при проверке или ремонте. По оценкам специалистов, реализация ЦТТ/ЦТН «имеет важное значение для развития систем автоматизации подстанций». Аналогично, в литературе отмечается, что использование шины процесса IEC 61850 «существенно меняет

архитектуру ПС», обеспечивая финансовые и эксплуатационные выгоды при проектировании цифровых подстанций.

В частности, digital bus (шина процесса) позволяет связать устройства систем управления подстанцией с ячейками КРУ напрямую по Ethernet, а цифровые трансформаторы передают результаты измерений в распределённую вычислительную сеть. Это делает возможным новые топологии автоматики, в том числе полностью цифровую архитектуру, где обмен сигналами защиты и управления осуществляется лишь по протоколам IEC 61850 GOOSE и SV. В такой схеме повышается быстродействие защиты и улучшается качество мониторинга – все события (включения/выключения, аномалии) фиксируются синхронно с сигналами и могут анализироваться в реальном времени.

Таким образом, применение ЦТТ/ЦТН ведёт к следующим эффектам:

- Сокращению объёма вторичных кабельных трасс и упрощению схем вторичного питания;
- Увеличению надёжности работы измерительных систем (защита от насыщения, всплесков и помех);
- Повышению скорости и информативности работы релейных защит и АСУТП за счёт дополнительных измерений и онлайн-мониторинга;
- Общему удешевлению эксплуатации: цифровое оборудование легче масштабируется, модернизируется и интегрируется с ИИЭС через цифровые интерфейсы.

4. Анализ рынка и примеры применения.

На российском рынке уже представлены решения в области цифровых измерительных трансформаторов от нескольких производителей. Так, НПП «ЭКРА» (Чебоксары) выпускает полные комплексы цифровой автоматики для ПС и РУ, включая оптические трансформаторы тока. Например, на проекте подстанции «Тобол» (500 кВ) компании «Силовые машины» поставлялись измерительные оптические трансформаторы тока 500 кВ с выходом SV,

интегрированные с релейными защитами по ИЕС 61850-9-2. Это позволило отказаться от медных кабелей, заменив их на цифровую сеть [4].

ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы» (г. Иваново), выполняющее НИОКР и разработки в области ЦТТ/ЦТН. В 2020–2023 гг. специалисты этой организации участвовали в проектах по цифровизации ПС (например, расчёты времени до насыщения трансформаторов на Нижневартовской ГРЭС) и разрабатывали методики для интеграции ЦТИН с системами ФСК ЕЭС.

Заключение

Цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения представляют собой важный элемент современной цифровой подстанции. Они обеспечивают высокоточную оцифровку первичных сигналов и передачу данных по стандартизованным цифровым протоколам. Это даёт многократный эффект: повысив точность и надёжность измерений, сокращая объём и сложность вторичных цепей, ЦТТ/ЦТН способствуют более глубокой интеграции систем РЗА и АСУ с информационной инфраструктурой подстанции. Развитие технологий ЦТТН сопровождается поддержкой международных и национальных стандартов (ИЕС 61850, ИЕС 61869, ГОСТ), что стимулирует их широкое внедрение. Анализ рынка показывает, что в России уже сформировался небольшой конкурентный рынок производителей подобных устройств, реализующих конкретные решения на объектах 110–500 кВ. С переходом к цифровой архитектуре подстанций применение ЦТТ/ЦТН неизбежно станет общепризнанным стандартом, обеспечивающим более эффективную работу сетевого хозяйства.

Список литературы

1. Андрианова Л.П., Павлова З.Х., Хакимьянов М.И., Хазиева Р.Т. Основы построения цифровых подстанций в рамках концепции „Цифровая трансформация 2030“. – Сборник «Энергия Арктики – 2023», Архангельск: КИРА, 2024, с. 213–218.

2. Беккер Ф., Ортега Г. Создание современных, компактных и гибких подстанций с помощью нетрадиционных преобразовательных приборов и технологической шины. - Бюллетень IEEE Smart Grid, 2016, с. 78-90.
3. Казакова Е.А., Зуев И.Н., Щекочихин А.В. Актуальность применения цифровых подстанций. – Журнал «Актуальные исследования» №22 (49), 2021, с. 3–10.
4. НПП «ЭКРА». Опыт реализации проектов цифровых подстанций (презентация, 2018). – Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2018/08/Opyt-realizatsii-proektov-TSifrovyh-podstantsij-NPP-EKRA.pdf>.
5. ООО «НПО „Цифровые измерительные трансформаторы“» (Иваново). Цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения 6–110 кВ (техническое описание) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://digitrans.ru/ctrettin/>.
6. Плакидин Р.С., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И., Андреев П.И., Мокеев А.В. Вопросы применения цифровых трансформаторов тока на основе катушки Роговского для цифровых подстанций. – Материалы научно-техн. семинара «Новые трансформаторы тока и напряжения (НТТН-2023)», Сочи, 2023, с. 24–30.

References

1. Andrianova L.P., Pavlova Z.X., Hakimyanov M.I., Hasieva T.T. Basics of building digital substations within the framework of the concept of Digital Transformation 2030". - Collection «Energy of the Arctic - 2023», Archangelsk: KIRA, 2024, pp. 213-218.
2. Becker F., Ortega G. Enabling Modern, Compact and Resilient Substations through Non-Conventional Instrument Transformers and Process Bus. – IEEE Smart Grid Bulletin, May 2016, pp. 78–90.
3. Kazakova E.A., Zuev I.N., Щекочихин A.V. Relevance of the application of digital substations. - Journal «Current studies» 22 (49), 2021, pp. 3-10.

4. SPE «ECRA». Experience of implementation of digital substations projects (presentation, 2018). - Access mode: <http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2018/08/Opyt-realizatsii-proektov-TSifrovyyh-podstantsij-NPP-EKRA.pdf>.
5. NGO "Digital Measuring Transformers" (Ivanovo). Digital measuring transformers current and voltage 6-110 kV (technical description) [E.Source]. - Access mode: <https://digitrans.ru/ctrettin/>.
6. Plagiidina R.S., Ulyanov D.N., Chromtsov E.I., Andreev P.I., Mokeyev A.V. Questions of application of digital current transformers on the basis of Rogovsky coil for digital substations. - Materials of scientific and technical seminar «New current and voltage transformers (NCVT-2023)», Sochi, 2023, pp. 24-30.