

УДК 621.315

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ: ОТ АНАЛОГОВЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ К МЭК 61850 ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Шадрин А.В., старший оператор
Научный руководитель: Петров А.А., младший научный сотрудник
Федеральное государственное автономное учреждение «Военный
инновационный технополис ЭРА»
г. Анапа

Обеспечение надежности и устойчивости единой энергетической системы (ЕЭС) Российской Федерации (РФ) не возможно без совершенствования релейной защиты и автоматики (РЗА). Критически важную роль в функционировании РЗА играют каналы передачи сигналов между устройствами. В историческом развитии электроэнергетики применялись три типа каналов: кабельные линии связи (КЛС), высокочастотная (ВЧ) связь и волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).

Первой широко распространённой технологией стали КЛС, в частности контрольные кабели типа ТЗБ. КЛС представляют собой проложенный в грунте бронированный кабель с медными изолированными жилами и общей бумажной изоляцией, они обеспечивают гальваническую связь между подстанциями (ПС) на расстоянии от 1,5 до 2 км. Недостатками технологии КЛС являются: высокая уязвимость к наведённым напряжениям при коротких замыканиях на соседних цепях, что может приводить к ложным срабатываниям или отказам в работе; подверженность коррозии брони в агрессивных грунтах и старение изоляции со временем снижает надёжность; ограниченная длина вызванная ростом сопротивления цепи, что особенно критично для чувствительных электромеханических реле [1]. По КЛС передаются только дискретные сигналы команд по типу телеотключения (ТО) и телеускорения (ТУ), за редким исключением в эксплуатации встречаются продольные дифференциальные защиты линий малой протяженности где используются КЛС в качестве передачи аналоговых значения тока. Современные отраслевые стандарты, такие как СТО 34.01-9.2-004-2019 [2], полностью исключают применение КЛС для устройств РЗА в сетях выше 35 кВ, допуская их эксплуатацию только в экономически обоснованных случаях. Здесь же стоит упомянуть о кабельных внутриподстанционных электрических цепях, они же вторичные цепи, предназначенные для передачи сигналов от первичного оборудования к устройствам РЗА. Кабельные вторичные цепи представляют собой кабель с медными жилами, по которым передаются аналоговые и дискретные сигналы.

На смену КЛС пришла высокочастотная (ВЧ) связь, получившая широкое распространение с 1960-х годов для линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 35 кВ и выше. Данная технология использует фазу ЛЭП в качестве канала передачи сигнала в диапазоне от 30 до 500 кГц. ВЧ связь включает в свою схему приемо-передатчики, конденсаторы связи и заградители ВЧ токов. Преимуществами ВЧ связи является отсутствие необходимости прокладывать отдельный кабель, что значительно снижает затраты и упрощает проектирование. Однако данная технология также имеет ряд существенных недостатков. Она чрезвычайно чувствительна к внешним воздействиям: грозовые разряды, коммутационные перенапряжения и обледенение проводов создают широкополосные помехи, которые могут привести к ошибкам приёма или полной потере сигнала. Кроме того, эффективность канала сильно зависит от состояния ЛЭП, её повреждение может вызвать рассогласование канала и значительное увеличение затухания. Максимальная длина ВЧ канала ограничена суммарным затуханием, которое не должно превышать 18 дБ согласно СТО 56947007-33.060.40.134-2012 [3], что соответствует примерно 150 км. Стоит отметить, что ВЧ связь передает только дискретные сигналы и не поддерживает передачу сигналов по протоколам МЭК 61850. Ввиду этих ограничений ВЧ связь постепенно выводится из эксплуатации, а современные нормативы допускают её использование только в паре с резервным каналом, таким как ВОЛС [2].

Плавнo переходя к ВОЛС стоит сказать, что технология относительно новая, она стала внедряться в последние десятилетия, и представляет из себя набор оптических волокон (ОВ) сигнал по которым передается в виде световых импульсов. По способу прокладки ВОЛС между ПС может быть: оптический кабель самонесущий (ОКСН), подвешенный на опорах воздушных линий электропередачи (ЛЭП); оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос (ОКГТ); оптический кабель неметаллический навивной (ОКНН), наматываемый на фазный провод или грозотрос; оптический кабель, встроенный в фазный провод (ОКФП); оптический кабель, проложенный в отдельной трассе [4]. Помимо передачи сигналов между ПС, по ОВ на сегодняшний день реализуется вторичные цепи. Значительными преимуществами передачи сигналов по ОВ являются: гальваническая развязка, которая обеспечивает высокую помехоустойчивость; высокая пропускная способность, позволяющая передавать не только дискретные, но и аналоговые сигналы.

Но не только благодаря значительным достоинствам ВОЛС и желанием модернизировать оборудование обусловлен переход от устаревших каналов связи, а также от фундаментальных изменений в самих устройствах РЗА. Этот переход стал возможен благодаря двум ключевым факторам: развитию стандарта МЭК 61850, который задал новый вектор развития РЗА, и формированию строгой нормативной базы, закрепившей требования к качеству каналов связи. Именно эти два столпа технологический и регуляторный делают ВОЛС не просто хорошей, а безальтернативной технологией для современных и реконструируемых объектов энергетики.

Стандарт МЭК 61850 [5] представляет собой унифицированную архитектуру для цифровых подстанций, которая кардинально меняет подходы к построению систем РЗА. В отличие от традиционной схемотехники с её многочисленными медными кабелями, МЭК 61850 основывается на цифровой передаче данных по специализированной сети. Ключевую роль здесь играют три сервиса, каждый из которых предъявляет свои требования к каналу связи:

Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) – это протокол для быстрой передачи дискретных команд, таких как ТО и ТУ. Его главное преимущество — минимальная задержка, которая может составлять до 4 мс, что позволяет реализовать быстроедействие РЗА.

Sampled Values (SV) – это протокол предназначенный для передачи оцифрованных вторичных токов и напряжений от измерительных трансформаторов к терминалам РЗА. SV требует высокой пропускной способности и точной синхронизации времени (PTP).

Manufacturing Message Specification (MMS) – протокол для передачи конфигурационных данных, параметров уставок, аварийных записей и диагностики. Он обеспечивает взаимодействие между устройствами РЗА, автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП), и диспетчерскими центрами, формируя единую информационную среду.

Реализация любого из этих протоколов невозможна без высокопроизводительной цифровой сети, такой как ВОЛС. Именно она обеспечивает необходимую скорость, надёжность и пропускную способность для одновременной работы всех трёх сервисов.

Вторым не менее важным фактором является нормативное регулирование. Отраслевые стандарты ПАО «Россети» стали главным регулятором рынка, определяющим допустимые и предпочтительные решения. Ключевым документом здесь является [2], который содержит количественные требования к каналам связи для РЗА. В частности, он устанавливает максимально допустимую задержку сигнала для систем противоаварийной автоматики на уровне 10 мс и вероятность отказа канала не более 10^{-4} в год. Эти показатели легко достигаются с помощью ВОЛС, но практически невыполнимы для КЛС и ВЧ-связи в реальных условиях эксплуатации. Другой важный стандарт, СТО 34.01-21-004-2019 [6], устанавливает обязательное применение архитектуры МЭК 61850 и ВОЛС для новых подстанций напряжением 110–220 кВ. Таким образом, нормативная база не просто рекомендует, а фактически обязывает проектировщиков и эксплуатирующие организации использовать ВОЛС как основу для построения современных систем РЗА.

Выбор канала связи для систем РЗА сегодня – это не только инженерное решение, но и стратегический шаг, который должен соответствовать долгосрочным целям развития всей электроэнергетической отрасли России. Анализ государственных стратегических документов показывает, что переход на ВОЛС и архитектуру МЭК 61850 является не просто одним из возможных путей, а ключевым, безальтернативным условием для достижения поставленных

национальных целей. Эти документы создают мощный регуляторный и финансовый фон, который делает использование устаревших технологий (КЛС, ВЧ) экономически нецелесообразным и стратегически рискованным.

Ведущим документом является энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года [7], утверждённая распоряжением Правительства РФ. В ней цифровизация ЕЭС и создание единой цифровой платформы выделены в качестве одного из приоритетных направлений развития. Стратегия ставит конкретные задачи по повышению надёжности энергоснабжения, снижению уровня потерь электроэнергии в сетях (с 10,1% в 2023 году до $\leq 7,3\%$ к 2050 году) и обеспечению технологического суверенитета в критически важных сегментах. Реализация этих амбициозных целей немыслима без внедрения современных систем РЗА, которые требуют высоконадёжных и быстрых каналов связи.

Обсуждение перехода на ВОЛС было бы неполным без анализа его практического внедрения и вопросов технологического суверенитета. Успешное внедрение новой технологии зависит не только от её технических характеристик, но и от наличия готовых решений, опыта их применения и возможности обеспечить независимость от импортного оборудования. К счастью, в России активно развиваются все эти компоненты, что создаёт благоприятные условия для массового перехода на современные каналы связи.

Практический опыт внедрения цифровых подстанций и ВОЛС уже накоплен и демонстрирует высокую эффективность нового подхода. По данным за 2021 год, введено в эксплуатацию более 84 цифровых подстанций напряжением 35–220 кВ в различных регионах страны [8]. Эти проекты послужили полигонами для проверки технологий и отработки методик проектирования и эксплуатации. Например, проект ПС 110 кВ «Медведевская» в Московских высоковольтных сетях [9], наглядно демонстрирует преимущества цифровой архитектуры на основе МЭК 61850 и ВОЛС. Проект позволил отказаться от трудоёмких медных кабельных связей, внедрить постоянный мониторинг целостности каналов и обеспечить гибкость конфигурирования защитных функций за счёт программного управления. Подобные проекты, включая запуск цифровой ПС «Мирная» в Республике Башкортостан в 2025 года [10], подтверждают, что переход на ВОЛС это реальная и успешная практика, а не теоретическая концепция.

Второй важнейший аспект – технологический суверенитет. В условиях глобальной геополитической обстановки и санкционных ограничений обеспечение независимости от импортных компонентов стало стратегической задачей для любой критически важной инфраструктуры, включая энергетику. В области РЗА Россия добилась значительных успехов в импортозамещении. Разрабатываются и производятся собственные микропроцессорные терминалы РЗА, такие как «ЭКРА 200», «ТОР 300», «БМРЗ-150-Е». Эти устройства имеют полную поддержку стандарта МЭК 61850 и предназначены для работы в архитектуре цифровой подстанции. Также не стоит забывать про сетевые коммута-

торы и аналого-цифровые преобразователи необходимые для обработки и передачи сигналов, представителем данной ниши является компания «Прософт-Системы» занимающаяся автоматизацией энергетической отрасли [11]. Наличие полноценного набора отечественных компонентов для построения цифровой подстанции по МЭК 61850 полностью исключает зависимость от зарубежных поставщиков и обеспечивает технологическую независимость и кибербезопасность всей системы РЗА.

Сравнение трёх технологий каналов передачи данных наглядно демонстрирует доминирование ВОЛС во всех ключевых параметрах. Если КЛС и ВЧ каналы, разработанные десятилетия назад ограничены помехоустойчивостью, длиной и низкой пропускной способностью, то ВОЛС предоставляет почти идеальные параметры для передачи информации.

Несмотря на очевидные преимущества, процесс перехода сопряжён с определёнными трудностями. К ним относятся необходимость подготовки новых квалифицированных кадров, способных работать на стыке двух областей РЗА и АСУ ТП, а также вопросы совместимости оборудования разных производителей, хотя стандарт МЭК 61850 и призван их решить, тем не менее, эти вызовы преодолимы. Будущее развития каналов связи для РЗА будет связано с дальнейшим углублением цифровизации: внедрением искусственного интеллекта для прогнозирования отказов оборудования, развитием концепции «умной сети» и интеграцией с новыми источниками энергии и системами хранения. Однако все эти перспективы будут строиться на одной прочной фундаментальной основе – надёжной, быстрой и высокопроизводительной ВОЛС.

Список литературы:

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. Для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат. 1992. – 528 с.: ил.
2. СТО 34.01-9.2-004-2019. Каналы связи для РЗА. Технические решения для сети 35-220 кВ.: утв. ПАО «Россети»: введ. в действие 28.06.2019.
3. СТО 56947007-33.060.40.134-2012. Типовые технические решения по системам ВЧ связи.: утв. ОАО «ФСК ЕЭС»: введ. в действие 30.10.2012.
4. СТО 56917007-33.180.10.172-2014. Технологическая связь. Правила проектирования, строительства и эксплуатации ВОЛС на воздушных линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше.: утв. ОАО «ФСК ЕЭС»: введ. в действие 21.05.2014.
5. СТО 56947007-25.040.30.309-2020. Корпоративный профиль МЭК 61850.: утв. ПАО «Россети»: введ. в действие 24.03.2023.
6. СТО 34.01-21-004-2019. Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110-220 кВ и узлов цифровых подстанций напряжением 35 кВ.: утв. ПАО «Россети»: введ. в действие 29.03.2019.

7. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года.: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации.: введ. в действие 12.04.2025.

8. Ассоциация «Цифровая энергетика». Российский опыт цифровой трансформации.: альманах / Ассоциация «Цифровая энергетика». – Москва, 2021. – 128 с.

9. Мартихин А.Ю. Первая в московском регионе. Разработка проекта цифровой подстанции / А.Ю. Мартихин, И.С. Рыбин, А.В. Гурьев // Цифровая подстанция. – 2018. – № 5(50). – С. 12–17.

10. «Башнефть» запустила в Башкирии цифровую подстанцию//URL: <https://neftegaz.ru/news/energy/889247-bashneft-zapustila-v-bashkirii-tsifrovuyu-podstantsiyu/> (дата обращения: 25.02.2026).

11. Официальный сайт ProSoft Systems//URL: <https://prosoftsystems.ru/> (дата обращения: 25.02.2026).