

УДК 621.398

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ И ИХ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА¹

Лизунов И.Н., Васев А.Н., Мисбахов Р.Ш., Федотов В.В., Хафизова Э.А.

Казанский государственный энергетический университет
digital-laboratry@mail.ru

Резюме: В данной статье рассматриваются показатели качества каналов связи интерфейсов RS-485, Ethernet, используемых в настоящее время для организации систем сбора и передачи информации (ССПИ) на подстанциях. Предложено использовать пассивные оптические сети на базе технологии GPON в качестве решения существующей проблемы электромагнитных воздействий на медные каналы связи и дорогостоящего телекоммуникационного оборудования (коммутаторов, маршрутизаторов, шлюзов) для волоконно-оптических каналов связи. Также производится расчет (пинг) и анализ (BER) показателей качества каналов связи и для технологии GPON, исходя из которого делается вывод о целесообразности организации ССПИ на базе данной технологии.

Ключевые слова: РЗА и ПА, ССПИ, пассивная оптическая сеть, xPON, GPON, Ethernet, RS-485, каналы связи, МЭК-61850.

TECHNOLOGIES OF DATA TRANSFER IN MODERN RELAY PROTECTION SYSTEMS AND AUTOMATICS AND THEIR QUALITY INDICATORS

Lizunov I.N., A.N.Vasev, Misbahov R.SH., Fedotov V.V., Khuziahmetova E.A.
KSPU, Kazan, Russia
digital-laboratry@mail.ru

Annotation: This article explores RS-485, Ethernet interfaces performance, quality of communication channels, currently used for the organization of information collection and transmission substations. It is suggested to use GPON-based passive optical network technology as a solution to the existing problem of electromagnetic effects on copper communication channels and high cost of telecommunications equipment (switches, routers, gateways) for fiber-optic channels. It is also calculated (Ping) and analysis (BER) for GPON technology. It was concluded, that it's feasible to organize information collection and transmission system with the GPON-technology.

Keywords: relay protection and automation, passive optical network, xPON, GPON, Ethernet, RS-485 communication channels, IEC 61850.

Введение

В последние десятилетия на смену электромеханическим и статическим реле приходят системы и устройства микропроцессорной релейной защиты и автоматики

¹ Проект выполняется в рамках исполнения 2 этапа работ соглашения № 14.577.21.0194 от 27.10.2015 г по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»

(микропроцессорные реле). Согласно данным приведенных статистик по установленным микропроцессорным реле в США на 2007 год приходилось от 30% (дифференциальная защита шин) до 65% (защита генераторов) устройств [1]. По данным, приведенным в «Концепции развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса»², в России на 2015 год в эксплуатации находится 18,43% микропроцессорных устройств от общего числа устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Согласно данным отчета прогноза роста рынка [2] микропроцессорной релейной защиты с 2016 по 2021 г. ожидается рост за пять последующих лет не менее чем на 30 % до 4,54 млрд. долл, что свидетельствует о сохраняющейся тенденции увеличения количества микропроцессорных реле в составе систем релейной защиты и автоматики во всем мире.

Современные микропроцессорные реле представляют собой не только устройства, обеспечивающие защиту электроустановок различных классов напряжения, но и обладают возможностью выполнять функции систем контроля и управления, телемеханики, мониторинга и контроля РЗА и противоаварийной автоматики (ПА). Данные функции реализуются при опросе микропроцессорных реле, входящих в системы сбора и передачи информации (ССПИ), по отдельным каналам связи. Перспектива развития концепции «цифровой подстанции» определяет необходимость развертывания уже единой внутриобъектной ССПИ для систем РЗА, SCADA и других систем автоматизации согласно стандарту МЭК 61850 [3].

На фоне роста количества выполняемых микропроцессорными реле функций, к оборудованию и каналам связи предъявляются все более высокие требования по надежности, быстродействию, резервированию, а также по электромагнитной совместимости, вплоть до создания подстанционных сетей с нулевыми потерями пакетов данных [4]. Экономический аспект также является важной составляющей возможности внедрения инновационных решений. В большинстве случаев решения, приносящие качественный технологический эффект, но приводящие к удорожанию, продолжительное время не могут найти широкого применения. Поэтому актуальным является направление поиска компромиссных решений, содержащих в себе преимущества новых технологий, устраняющих недостатки старых и предоставляющих дополнительные функции, улучшающие производительность и надежность систем в целом, при этом являющихся экономически обоснованными.

Зачастую для объектов среднего класса напряжения стоимость развертывания ССПИ соотносима со стоимостью самих объектов. На объектах высокого класса напряжения стоимость развертывания таких систем оправдана, поскольку аварийные ситуации и связанные с ними перерывы в электроснабжении недопустимы по требованиям надежности и качества электроснабжения крупных промышленных и коммунальных потребителей, по требованиям обеспечения режимов работы сети, а также из-за сопровождающего их значительного экономического ущерба.

Проблема электромагнитных воздействий

При развертывании ССПИ на объектах электроэнергетики также необходимо учитывать влияние сложной электромагнитной обстановки внутри высоковольтного электрооборудования, через которые или рядом с которыми проложены каналы связи и установлено оборудование ССПИ. Согласно данным статистики, указанным в «Концепции развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса», в 2014 году зафиксировано 1399 случаев неправильного срабатывания релейной защиты и автоматики, из них по невыясненным причинам зафиксировано 38 случаев, по неправильным указаниям

²Приложение №1 к протоколу Правления ОАО «Россети» от 22.06.2015 № 356 пр «Концепция развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса»;

– 6, по прочим – 198. Указанные формулировки не позволяют точно судить о том, что послужило причиной ложного срабатывания, однако очевидно: одним из факторов является влияние помех на каналы связи.

Несмотря на то, что все устройства и каналы связи без проверки на соответствие стандартам электромагнитной совместимости не вводятся в эксплуатацию, полностью исключить влияние помех не представляется возможным [5]. Данная проблема является актуальной во всем мире. Например, по данным японских компаний-изготовителей [6] по повреждаемости систем микропроцессорных реле от электромагнитных воздействий число временных и постоянных повреждений составляет, в среднем, 6 случаев за год.

Традиционно, для организации передачи данных в ССПИ на объектах энергетики различных классов напряжения, в настоящее время в большинстве случаев используются каналы связи на базе *RS-485* и *Ethernet*, преимущественно на основе витой пары. Однако все чаще производители, по требованию заказчика, устанавливают оптические преобразователи интерфейса для *RS-485* или высокоскоростные оптические порты *Ethernet*. Данные решения позволяют использовать преимущества оптических передатчиков:

- надежность каналов связи;
- высокая скорость передачи данных;
- помехозащищенность;
- широкая полоса пропускания;
- возможность использования спектрального уплотнения (организация полнодуплексной связи с использованием всего одного волновода);
- пожаробезопасность;
- гарантированная пропускная способность (при использовании синхронной/плезioxронной цифровой иерархии сети (*SDH/PDH*));
- возможность создания протяженных линий связи.

Несмотря на очевидные преимущества, для организации сети на основе оптических каналов связи требуется сложное активное коммуникационное оборудование – оптические коммутаторы, цена которых в разы выше их традиционных аналогов, что ограничивает широкое применение оптических решений, повышающих надежность электроснабжения, а также управляемость энергообъектами в целом.

Необходимо отметить, что на сегодня экономически целесообразным для объектов среднего напряжения становится построение систем релейной защиты или систем сигнализации не на основе отдельных микропроцессорных реле (защищающих свой отдельный фидер), а в качестве единой для всего объекта централизованной системы управления, защиты и сигнализации, представляющей собой совокупность микропроцессорных устройств присоединений, высоконадежной ССПИ и центрального управляющего узла. ССПИ в таком случае является основным узлом, определяющим надежность, качество и функционал работы централизованной системы, что, в свою очередь, предъявляет значительные требования как к проложенным на объекте каналам связи, так и к надежности и помехоустойчивости устройств ССПИ.

Сравнение каналов передачи данных технологий связи на подстанциях производится по двум параметрам:

- пинг – время, которое требуется пакету данных, чтобы достичь выбранного устройства через сеть, а потом прийти обратно на исходное устройство;
- *BER (Bit Error Rate)* – соотношение между правильно переданными битами информации и неправильно переданными.

Показатели качества *RS-485*

Интерфейс *RS-485* – широко распространенный интерфейс связи в промышленности и энергетике в частности, что обуславливается его гибкостью, простотой программирования

и сравнительно высокой скоростью передачи данных (до 10 Мбит/с). Традиционная архитектура ССПИ на основе данного интерфейса показана на рис.1.

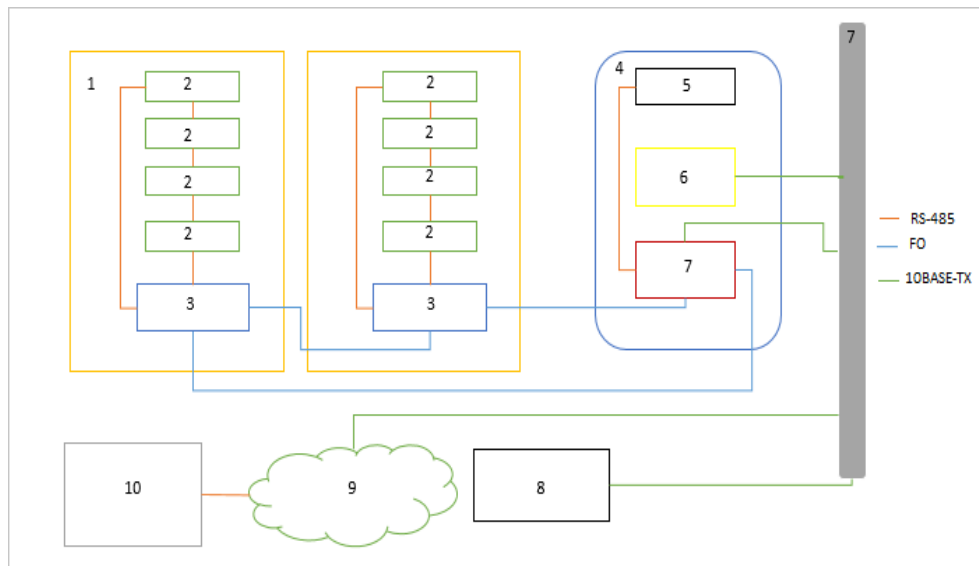


Рис.1. Архитектура подстанционной сети на базе RS-485: 1 – шкафы полевого уровня; 2 – модули входных, выходных дискретных сигналов, аналоговых унифицированных сигналов; 3 – медиаконвертер RS-485/FO; 4 – шкаф коммуникационного уровня; 5 – GPS – модуль синхронизации; 6 – Ethernet-коммутатор; 7 – LAN – протокол DNP3; 8 – АРМ; 9 – Протокол МЭК60870-5-104/5-101; 10 – Диспетчерский центр, FO - ВОЛС

Существуют факторы, ограничивающие при определенных условиях возможности данного интерфейса:

- длина кабеля;
- конструкция кабеля;
- импеданс кабеля – емкость и индуктивность сглаживают форму импульсов, что повышает вероятность возникновения ошибки, при передаче данных;
- запас помехоустойчивости;
- скорость нарастания входного напряжения драйвера;
- согласование оконечной нагрузки – хорошее согласование сводит отражения сигнала к минимуму, повышая качество обмена информацией в целом.

Рассмотрим основные показатели качества интерфейса RS-485:

1) Максимальное время обхода пакета по основному пути T_{max} определяется по следующему выражению [7]:

$$T_{max} = (T_{пак} + T_{пак} + T_{пути}) * N_k = \left(\frac{N_p + 2}{10^6} + 10^{-3} + \frac{1 * 2}{3 * 10^8} \right) * N_k, \quad (1)$$

где $T_{пак}$ – время отправки пакета, с; $T_{зад}$ – время задержки на входных регистрах, (1 мс); $T_{пути}$ – время доставки сообщения по витой паре, с; $N_p + 2$ – размер пакета сообщения, байт; N_k – число узлов в кольце; m ; l – среднее расстояние между узлами, м.

$$T_{max} = \left(\frac{8 + 2}{10^6} + 10^{-3} + \frac{3 * 2}{3 * 10^8} \right) * 5 = 0,005с. \quad (2)$$

Как видно из расчетов, полная задержка зависит, в основном, от быстродействия входных регистров, накладывающих основные ограничения на использование интерфейса RS-485 в современных ССПИ. Данная задержка является приемлемой для доставки управляющих сигналов и сигналов автоматизированного опроса микропроцессорных реле. Однако для каналов связи ПА и для критичных сообщений между микропроцессорными реле данный порог не должен превышать 5–10 мс [8].

2) Джиттер и BER. В качестве примера рассмотрим исследование показателей максимальной производительности системы связи на основе интерфейса RS-485. Для испытания использовалась витая пара 5 категории, передача велась на скорости от 1 до 39 Мбит/секунд при длине кабеля от 90 до 270 метров. По результатам испытаний, приведенных в работе [9] при исследовании показателей интерфейса RS-485, сети RS-485 способны обеспечивать скорость обмена данными до 52 Мбит/с при длинах кабеля, достигающих сотни метров без ретрансляторов или преобразователей интерфейсов.

Несмотря на все достоинства интерфейса RS-485, требования к каналам и интерфейсам связи в энергетике с каждым годом все выше. Данная тенденция связана с постоянным увеличением нагрузки и усложнением схем электрических сетей, появлением множества относительно маломощной генерации в различных точках сети. Также наблюдается тенденция к появлению новых протоколов связи (например, протоколы в рамках международного стандарта МЭК 61850), ведущих к усложнению микропроцессорных реле, совершенствованию алгоритмов защиты и введению новых функций. Ко всему прочему, заметен интерес к повышению «прозрачности» и управляемости электроэнергетических объектов, что невозможно осуществить при использовании устоявшихся технологий, в первую очередь, из-за ограниченной пропускной способности и уязвимости их к имеющим место быть на объектах электроэнергетики электростатическим разрядам.

При сложившейся ситуации актуальным является внедрение новых решений, позволяющих осуществлять надежный высокоскоростной обмен пакетами данных на энергообъектах различных классов напряжения.

Показатели качества Ethernet

Применение технологии сетей Ethernet на объектах энергетики для контроля и мониторинга режимов в реальном времени стало возможным благодаря разработке ведущими производителями сетевого оборудования, способного работать в условиях жесткой электромагнитной обстановки, и стандартов, описывающих правила взаимодействия элементов коммуникационных сетей. Коммуникационный протокол Industrial Ethernet (IE) был адаптирован под особенности устройств контроля, таких как RTU, микропроцессорное реле, устройства систем автоматизации энергообъектов. Внутриподстанционная сеть на основе Ethernet показана на рис. 2.

Технология Industrial Ethernet была выбрана для реализации стандарта МЭК 61850 в энергетике. Одной из особенностей МЭК 61850 является организация так называемой внутривидеостанционной шины техпроцесса, объединяющей полевые устройства, цифровые измерительные преобразователи с микропроцессорными реле, устройствами противоаварийной автоматики и системами автоматизации на подстанции, представляющие собой по терминологии стандарта – интеллектуальные электронные устройства (IED) (рис.3).

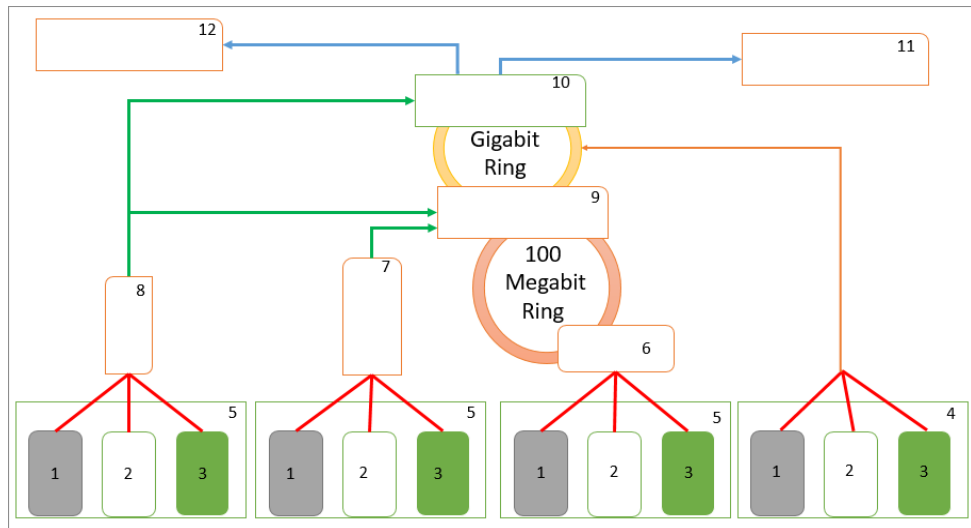


Рис. 2. Внутриобъектная ССПИ на базе Ethernet: 1 – Relay; 2 – RTU; 3 – IED; 4 – МЭК 61850; 5 – He МЭК 61850; 6 – RS 232/422/485 - Ethernet медиа конвертертер; 7 – коммуникационный шлюз; 8 – терминальный сервер; 9 – маршрутизатор второго уровня; 10 – маршрутизатор третьего уровня; 11 – АРМ; 12 – Scada HMI

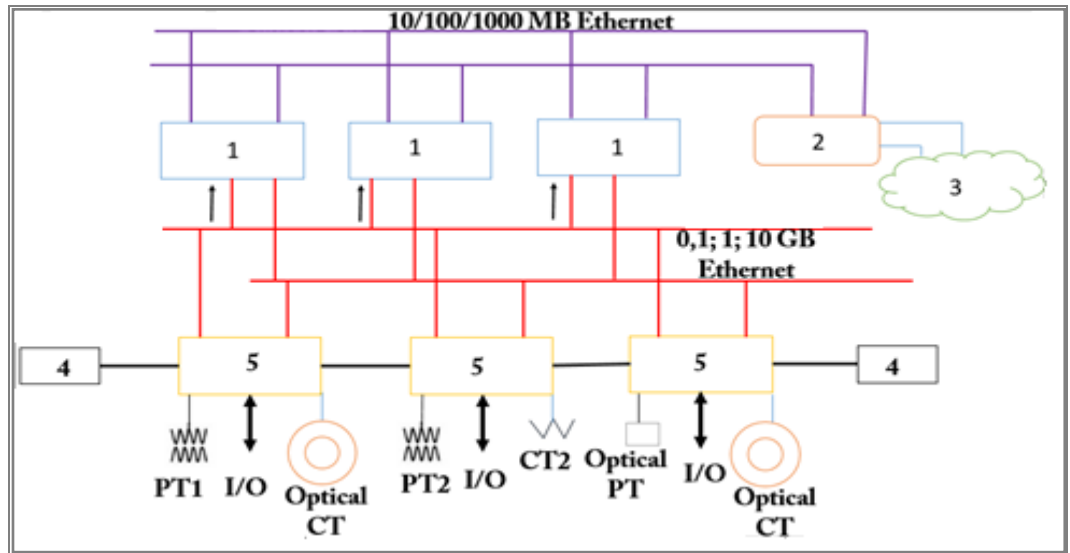


Рис. 3. Модель подстанции в соответствии с МЭК61850: 1 –реле; 2 –сервер удаленного доступа; 3 – внешняя сеть; 4 – блок синхронизации; 5 – интеллектуальное электронное устройство; PT – силовой трансформатор; Optical CT –оптический трансформатор тока; CT – традиционный трансформатор тока

Рассмотрим показатели качества каналов связи на основе Ethernet для наиболее требовательной к надежности, пропускной способности и гарантированности доставки данных коммуникационной системы МЭК 61850:

1) Максимальное время обхода кольца по основному пути T_{\max} определяется по следующему выражению [7]:

$$T_{\max} = (T_{\text{пак}} + T_{\text{зад}} + T_{\text{пути}}) * N_k = \left(\frac{8 * N_p}{10^8} + 10^{-6} + \frac{1 * n_{ov}}{3 * 10^8} \right) * N_k \quad (3)$$

где $T_{\text{пак}}$ – время отправки пакета, с; $T_{\text{зад}}$ – время задержки в мультиплексоре (5 мкс); $T_{\text{пути}}$ – время доставки сообщения по оптоволокну, с; N_p – размер пакета сообщения (байт); N_k – число узлов в кольце; l – полученное среднее расстояние между узлами, м; n_{ov} – показатель преломления оптоволокну (1,45–1,55).

Стандартная длина пакетов *GOOSE* составляет 1500 байт, для пакетов *Sample Value (SV, IEC 61850-9-2 (LE))* – 163 байт, число узлов в кольце не превышает 3 метра, среднее расстояние между узлами l в пределах подстанции составляет 5 метров.

Тогда для передачи пакетов *SV* максимальное время составит $T_{\max} = 56$ мкс; для *GOOSE* сообщений: $T_{\max} = 377$ мкс. Полученные значения являются приемлемыми в плане быстрейшей оперативной реакции при авариях, что, согласно требованиям стандарта МЭК-61850, не должно превышать 4 мс [8].

2) Согласно данным лаборатории университета Нью Хэмпшира [11], оборудование *Ethernet* стандартов *IEEE 802.3* демонстрирует функциональные характеристики и допускает наличие ошибок в пакетах, утвержденных при их разработке, с точностью 95%. В частности, показатель качества *BER* и, соответственно, количество неправильно переданных фреймов во многом зависит от конкретного оборудования, конфигурации сети, защищенности каналов связи и внешних условий и лежит в пределах 10^{-8} – 10^{-12} . Тем не менее, механизм прямой коррекции ошибок *FEC (Forward Error Correction)*, реализованный в том или ином виде, позволяет свести и без того их малое число до нуля, снижая, однако, общую пропускную способность сети. Согласно стандарту МЭК 61850 [3], механизм доставки *GOOSE*-сообщений представляет собой передачу информации в широкополосном диапазоне, а получение адресатом сообщения при этом отсутствует, поэтому *GOOSE*-сообщения передаются с особой периодичностью в установившемся режиме. Передача пакетов *SV* осуществляется схожим образом: при потере какого-либо из пакетов данные не передаются повторно, а восстанавливаются уже у адресата благодаря алгоритму восстановления потерянных данных с помощью линейной интерполяции [3]. Данные принципы доставки позволяют снизить область использования *FEC*-механизма, повышая при этом потенциальную пропускную способность сети.

Нарушение работы медных каналов связи в условиях электромагнитной обстановки на подстанциях из-за наводок при попадании молнии в ОРУ или рядом с подстанцией, согласно многочисленным данным статистики [6], приводит к ложным срабатываниям устройств релейной защиты, неправильным показаниям и также нередко – к необходимости замены дорогостоящего вторичного оборудования. В связи с чем имеется тенденция использования оптических медиаконвертеров, повышающих сложность и стоимость ССПИ в целом не только по части оборудования, но и при пуско-наладке, и дальнейшем обслуживании системы.

Обеспечение надежной высокоскоростной связи внутри подстанции на основе *Ethernet* на сегодняшний день является решенной задачей, однако создание полноценной сети со всеми мерами безопасности, резервированием и качеством передаваемых данных представляет собой очень дорогое мероприятие, в частности из-за высокой цены промышленных коммутаторов, маршрутизаторов и шлюзов.

Показатели качества *GPON*

В настоящее время, в связи с появлением и распространением в телекоммуникационной сфере более дешевых решений на основе технологий *xPON (Passive Optical Network; PON)*, построение сетей с волоконно-оптическими линиями связи

становится сравнительно доступнее. В частности, одним из наиболее успешных в данной сфере является стандарт *GPON* (*Gigabit PON*). Ключевыми особенностями *GPON* является использование только одного приемо-передающего устройства (*Optical Linear Terminal*) для приема и передачи информации множеству принимающих устройств (*Optical Network Unit* или *Optical Network Terminal*). При этом, в отличие от традиционных сетей, построенных на оптоволокне, нет необходимости в установке активных устройств в узлах сети; вместо них от основного кабеля делаются ответвления с помощью оптических сплиттеров, в связи с чем топология сети представляет собой «дерево с пассивными узлами».

Ключевыми аспектами данной технологии, позволяющими внедрить её на объекты электроэнергетики, являются:

- возможность установки модульных компактных трансиверов в формате стандарта *SFP* (*Small Form-factor Pluggable*) в микропроцессорные реле или в контроллеры присоединений (*bay-controller*) *SCADA* для организации каналов связи ССПИ;
- компактность сплиттеров позволяет их разместить в ограниченных пространствах, вплоть до отсеков РЗА в ячейках среднего напряжения;
- форматонезависимость передаваемых кадров;
- маршрутизация пакетов реализована в самих приемо-передающих устройствах, благодаря механизму управления данными *GTC*;
- стандарт *GPON* поддерживает следующие скорости: нисходящий трафик (от *OLT*) транслируется на скорости 1,25 – 2,5 Гбод, восходящий от (*ONT*) – на скоростях 0,155–1,25 Гбод.

На рис. 4 показана архитектура внутриподстанционной ССПИ на основе технологии *GPON*. В качестве устройства присоединения выступает измерительный многофункциональный контроллер ЭНИП-2, поскольку он представляется нам оптимальным вариантом по технико-экономическим показателям [14].

Далее рассмотрим показатели качества каналов связи внутриобъектной сети на основе технологии *GPON*.

1. Задержка доставки сообщений

а) Время доставки *GTC*-кадров в нисходящем направлении T_{\max} , мкс, определяется по формуле

$$T_{\max} = (T_{\text{пак}} + T_{\text{пак}} + T_{\text{пак}}) = (125 * 10^{-9} + (25,7 + 70,7) * 10^{-9} + \frac{l * n_{\text{ov}}}{3 * 10^8}) = 125, \quad (4)$$

где $T_{\text{пак}}$ – время отправки пакета стандартной длины 38880 байт (с), равное 125мкс; $T_{\text{зад}}$ – сторожевой интервал, формируемый из следующих значений: T_{lazer} – время переключения лазера (25,7 нс) и T_{pad} – время обработки пребулы (70,7 нс); $T_{\text{пути}}$ – время доставки сообщения по оптоволокну, с; l – расстояние до самого дальнего приемника, м; n_{ov} – показатель преломления оптоволокну (1,5).

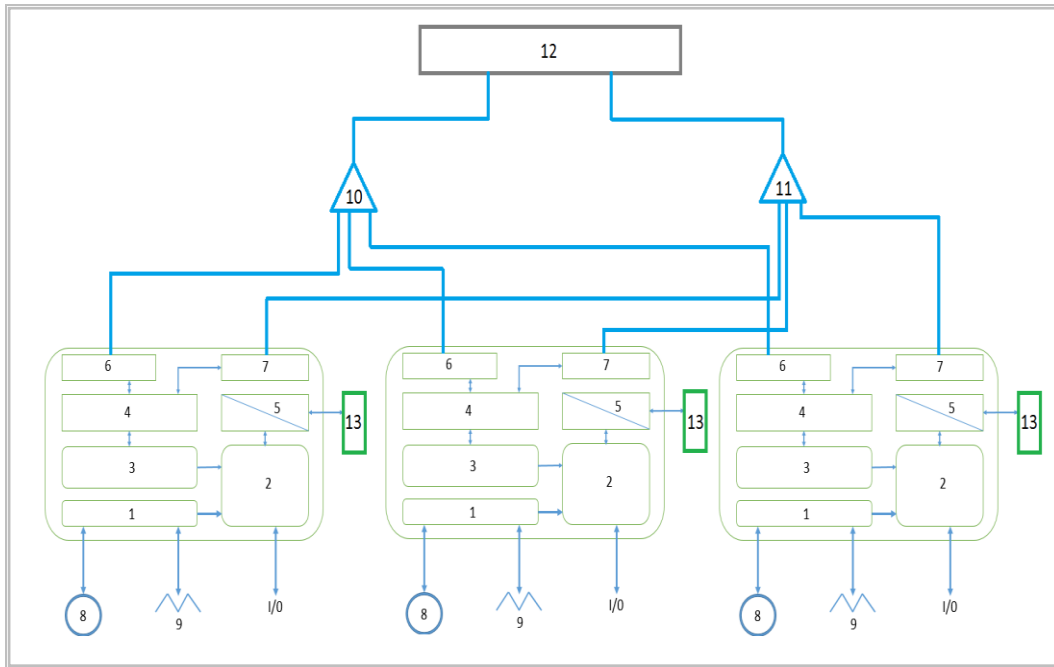


Рис. 4. Архитектура ССПИ на базе технологии GPON: 1 – АЦП, 2 – Сигнальный процессор; 3 – 1000 Мбод микроконтроллер Ethernet; 4 – медиаконвертер RGMII-SGMII; 5 – медиаконвертер RS-485; 6 – SFP-модуль GPON (ONT); 7 – резервный SFP-модуль GPON (ONT); 8 – Трансформатор напряжения; 9 – трансформатор тока; 10 – оптический сплиттер; 11 – резервный оптический сплиттер; 12 – коммутатор с поддержкой GPON (OLT); 13 – счетчик

Время доставки GTC-кадров в восходящем направлении T_{\max} определяется по формуле [7]

$$T_{\max} = (T_{\text{пак}} + T_{\text{зад}} + T_{\text{пути}}) = (125 * 10^{-9} + (25,7 + 70,7)^{-9} + \frac{1 * n_{ov}}{3 * 10^8}) = 125, \text{ мкс}, \quad (5)$$

где $T_{\text{пак}}$ – время отправки пакета стандартной длины 19440 байт (с), равное 125 мкс; $T_{\text{зад}}$ – сторожевой таймер, состоящий из T_{laser} – время переключения лазера (25,7 нс) и T_{pad} – преамбула (70,7 нс); $T_{\text{пути}}$ – время доставки сообщения по оптоволокну (с); l – расстояние до самого дальнего приемника, м; n_{ov} – показатель преломления оптоволокну (1,5).

Время задержки доставки сообщения зависит от величины буфера: при малой величине буфера, например 10 Мбайт, время задержки может достигать десятка миллисекунд, что показано в исследовании динамической полосы пропускания технологии GPON [11].

2. Анализ качества сигнала GPON

Далее рассмотрим результаты исследования качества сигнала сети GPON 2.5 ГБод [12]. Для исследования была применена имитационная модель в программном обеспечении Optisystem, содержащая: генератор случайных чисел, импульсный генератор NRZ (Non-Return to Zero), модулятор Маха-Цендера, источник непрерывного лазерного излучения, фильтр нижних частот, BER-анализатор, оптический фильтр Бесселя, 3R регенератор.

По результатам симуляции сети GPON, полученным в исследовании [12] (с одним OLT и множеством ONT) на длине волны 1550 нм, при длине участка оптоволокну 20 км, были получены показатели BER для ONT OLT $1,29 \cdot 10^{-12}$ и $4 \cdot 10^{-8}$ соответственно. Также в

работе [12] была получена глазковая диаграмма, демонстрирующая низкий уровень шума и джиттера.

Выводы:

Применение стандарта *Industrial Ethernet (IE)* в ССПИ на подстанциях стремительно набирает свою популярность, о чем можно судить по количеству решений, представленных на рынке. Однако ограничения использования несовершенного, с точки зрения помехозащищенности, *IE* на базе медных каналов связи и дороговизны *IE* с использованием оптических медиаконвертеров позволяют сделать заключение об актуальности поиска альтернативных решений, предлагающих компромисс между ценой оборудования и помехозащищенностью каналов связи.

Решение на основе пассивных оптических сетей является альтернативой, способной решить данную проблему. Показатели качества каналов связи технологии *GPON* удовлетворяют всем требованиям для использования её для каналов связи в РЗА, *SCADA*-системах и системах мониторинга РЗА и ПА. Особенности *GTC*-механизма передачи данных позволяют осуществить переход на *GPON* без дополнительных проблем, поскольку данный механизм во многом схож с *SDH*-технологией, уже успешно используемой в электроэнергетике.

Одним из преимуществ технологии *GPON* является встроенная высокоточная синхронизация и гарантия доставки сообщения в пределах 125 мкс, что критически важно для передачи аварийных сигналов, сигналов релейной защиты и сохранения устойчивости работы электроэнергетической сети в целом. Особо важным преимуществом данной технологии является поддержка *SFP*-модулей различных конфигураций, поддерживаемых интерфейсами современных устройств присоединений (например, ЭНИП-2). Также существуют конфигурации *SFP*-модулей, позволяющие организовывать каналы связи как на одном оптоволокне с помощью технологии *WDM*, так и на двух отдельных для нисходящего и восходящего трафика, что важно для создания резервных каналов связи.

Применение технологии *GPON* для построения ССПИ в централизованных системах управления, защиты и сигнализации на энергообъектах среднего класса напряжения может обеспечить высоконадежный, помехоустойчивый и высокоскоростной обмен данными между устройствами присоединений и центральным узлом, причем экономически целесообразным способом.

Литература

1. Abdelkader Abdelmoumene, Hamid Bentarzi «Reliability assessment and improvement of digital protective relays». 2014.
2. [Электронный ресурс] Protective Relay Market worth 4.54 Billion USD by 2021 Режим доступа: <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/protective-relay.asp>.
3. Drew Baigent, Mark Adamia, Ralph Mackiewicz, «Протокол МЭК 61850 Коммуникационные сети и системы подстанций. Общий обзор для пользователей».
4. Marzio P. Pozzuoli, «Zero-Packet-Loss in the Substation». 2010.
5. Гуревич В.И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. 2010.
6. Toshio Matsumoto, Yasuhiro Kurosawa, *Member, IEEE*, Masaji Usui, Koji Yamashita, *Member, IEEE*, and Taisei Tanaka. «Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment With High-Frequency Switching Surge in Japan». 1996.
7. Мукимов Ш.С., Бойко В.В. Расчет пропускной способности каналов связи для корпоративных сетей. 2014;
8. Лифшиц А.М. Переход к *Smart Grid* и цифровым подстанциям. Гибридный вариант построения сети связи и передачи данных. ООО «НПЦ Приоритет» 2013.
9. Хьюлсман М., Он Ф. «Каких показателей мы можем добиться при использовании RS-485?». 2006;

10. University of New Hampshire InterOperability Laboratory. «Ethernet physical layer interoperability test suite version 2.4 technical document». 2007.

11. Björn Skubic, Ericsson Research «A Comparison of Dynamic Bandwidth Allocation for EPON, GPON, and Next-Generation TDM PON». 2009.

12. S.Srinath «Performance Analysis of 2.5 Gbps GPON». 2014.

Авторы публикации

Лизунов Игорь Николаевич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией «ЦСИСЭ» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Васев Алексей Николаевич – начальник ССДТУ филиала ОАО «Сетевая Компания» Набережночелнинские электрические сети.

Мисбахов Ринат Шаукатович – канд. техн. наук, начальник Управления научно-исследовательской работы Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Федотов Владислав Валентинович – инженер НИЛ «ЦСИСЭ» Казанского государственного энергетического университета КГЭУ.

Хузиахметова Эльвина Альфредовна – инженер НИЛ «ЦСИСЭ» Казанского государственного энергетического университета КГЭУ.

References

1. Abdelkader Abdelmoumene, Hamid Bentarzi "Reliability assessment and improvement of digital protective relays". 2014;

2. [Electronic resource] Protective Relay Market worth 4.54 Billion USD by 2021 Access mode: <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/protective-relay.asp>

3. Drew Baigent, Mark Adamia, Ralph Mackiewicz, "Protocol IEC 61850 Communication networks and substation systems. General overview for users ";

4. Marzio P. Pozzuoli, "Zero-Packet-Loss in the Substation". 2010;

5. Gurevich VI, "The problem of electromagnetic effects on microprocessor relay protection devices." 2010;

6. Toshio Matsumoto, Yasuhiro Kurosawa, Member, IEEE, Masaji Usui, Koji Yamashita, Member, IEEE, and Taisei Tanaka. "Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment With High-Frequency Switching Surge in Japan". 1996;

7. Mukimov S.S., Boyko V.V. "Calculating the bandwidth of communication channels for corporate networks." 2014;

8. A.M. Lifshits (LLC "NPC Priority") "Transition to Smart Grid and digital substations. Hybrid variant of building a communication and data transmission network ". 2013;

9. Hughesman M., He F. "What indicators can we achieve when using RS-485?". 2006;

10. University of New Hampshire InterOperability Laboratory. "Ethernet physical layer interoperability test suite version 2.4 technical document". 2007;

11. Björn Skubic, Ericsson Research "A Comparison of Dynamic Bandwidth Allocation for EPON, GPON, and Next-Generation TDM PON". 2009;

12. S.Srinath «Performance Analysis of 2.5 Gbps GPON». 2014;

Authors of the publication

Lizunov Igor' Nikolaevich – Head of the Laboratory "DSNE" KSPEU, PhD;

Проблемы энергетики, 2017, том 19, № 1-2

Vasev Aleksej Nikolaevich - Head CCDTU branch of JSC "Network Company" Naberezhnochelninsky electric networks;

Misbahov Rinat SHaukatovich. – Head of the scientific research management KSPEU, PhD;

Fedotov Vladislav Valentinovich - engineering laboratory "DSNE" member KSPEU;

Huziahmetova EHI'vina Al'fredovna - engineering laboratory "DSNE" member KSPEU.

Поступила в редакцию

23 декабря 2016 г.