

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕЙ С ПАКЕТНОЙ КОММУТАЦИЕЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

© 2014 г. Харламов В.А.

ЗАО “Юнител Инжиниринг”<sup>1</sup>

e-mail: V.Harlamov@uni-eng.ru

В статье рассмотрены вопросы организации каналов для РЗА в сетях с пакетной коммутацией. Большинство цифровых систем передачи информации между объектами российской электроэнергетики построено на базе традиционных технологий SDH и PDH с временным разделением каналов. Показано, что на текущий момент времени и в ближайшей перспективе сети SHD/PDH удовлетворяют потребностям электроэнергетики, в том числе и для организации каналов для РЗА. Возможно, что при возрастании доли Ethernet-трафика эффективность использования доступной полосы сетей SDH/PDH будет падать и возникнет необходимость поиска решений на базе технологий пакетной коммутации. Отмечена необходимость соответствия новых решений требованиям, предъявляемым технологическими системами электроэнергетики к цифровым каналам. Проведенные испытания подтвердили принципиальную возможность организации каналов для РЗА по сетям на базе технологии пакетной коммутации MPLS, но для их внедрения вместо сетей SDH/PDH требуется решение целого ряда вопросов.

**Ключевые слова:** релейная защита и автоматика, сети с пакетной коммутацией, технологии SDH и PDH, технологические системы электроэнергетики, цифровые каналы.

Сегодня передача IP-трафика, например IP-телефония, IP-телевидение, видеонаблюдение по IP (Internet protocol – Протокол Интернет) и т.д., занимает все более преобладающую долю в общем трафике сетей операторов связи. Поэтому в цифровых системах передачи информации (ЦСПИ) операторов связи традиционные технологии Synchronous Digital Hierarchy (SDH) и Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) на базе временного разделения каналов Time Division Multiplexing (TDM) уступают место новым технологиям пакетной коммутации, которые позволяют более эффективно использовать доступные пропускные способности (полосы) каналов при передаче больших объемов пакетного трафика. Наибольшее распространение для передачи пакетных данных получил протокол Ethernet.

<sup>1</sup> 111024, Россия, Москва, 2-я Кабельная ул., д. 2, стр. 1. ЗАО “Юнител Инжиниринг”.

В российской электроэнергетике большинство ЦСПИ для связи между объектами построено с использованием технологий SDH/PDH. В мультиплексорах SDH/PDH осуществляется инкапсуляция данных с интерфейсов пользователей в виртуальные контейнеры определенного объема, которые непрерывно передаются друг за другом [1], что обеспечивает надежную передачу данных с малой детерминированной задержкой и без какого-либо взаимного влияния между разными каналами/пользователями. Оборудование сетей SDH/PDH поддерживает традиционно используемые в электроэнергетике протоколы и интерфейсы. Например, низкочастотные каналы для телефонии реализованы на базе импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) [1], что делает возможным подключение оборудования с сигнализацией аппаратуры дальней связи электроэнергетики (АДАСЭ) и низкоскоростных модемов телемеханики (ТМ) с частотной манипуляцией (ЧМ) для передачи данных по протоколам ТМ-800, Гранит и подобным.

Параметры сетей SDH/PDH позволяют организовывать по ним не только каналы телефонии и передачи данных, но и каналы для дифференциальных защит линий (ДЗЛ) и устройств передачи аварийных сигналов и команд (УПАСК) по стандартным синхронным цифровым интерфейсам G.703.1, X.21, E1 и C37.94 [2].

При отказе линии связи между мультиплексорами сети SDH/PDH в зависимости от их масштаба и топологии обеспечивают переключение каналов на резервные пути за время до 50 мс, что недопустимо много для ряда систем релейной защиты и автоматики (РЗА). Поэтому при необходимости резервирования каналов РЗА в них организуют основной и резервный каналы с использованием статических (фиксированных) путей через разные линии связи (рис. 1). При отказе одного из путей работа устройств РЗА продолжается по другому и не зависит от переключений в сети. Существует два варианта работы устройств РЗА при резервировании по статическим путям:

- устройства РЗА работают по основному каналу и при его отказе за несколько миллисекунд переключаются на резервный, что гораздо меньше, чем обеспечивают механизмы резервирования сетей SDH/PDH;
- устройства РЗА параллельно передают данные по основному и резервному каналам и параллельно принимают их, при отказе одного из путей работа непрерывно продолжается по другому, что обеспечивает “нулевое” время переключения или, как говорят, бесшовное переключение/резервирование.

В электроэнергетике IP все более широко используется не только для передачи между ее объектами корпоративного трафика (Internet, e-mail, SAP ERP и т.д.), но и технологического, например автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), с использованием протокола TCP/IP согласно [3] (TCP – Transmission Control Protocol – Протокол управления передачей).

В мультиплексорах SDH/PDH пакетный трафик с помощью стандартизированной технологии Ethernet over SDH (EoS) [4] инкапсулируется в отдельные виртуальные контейнеры определенного объема, что обеспечивает его полную изоляцию от других каналов и гарантирует заданную пропускную способность. При этом могут быть организованы различные схемы кана-

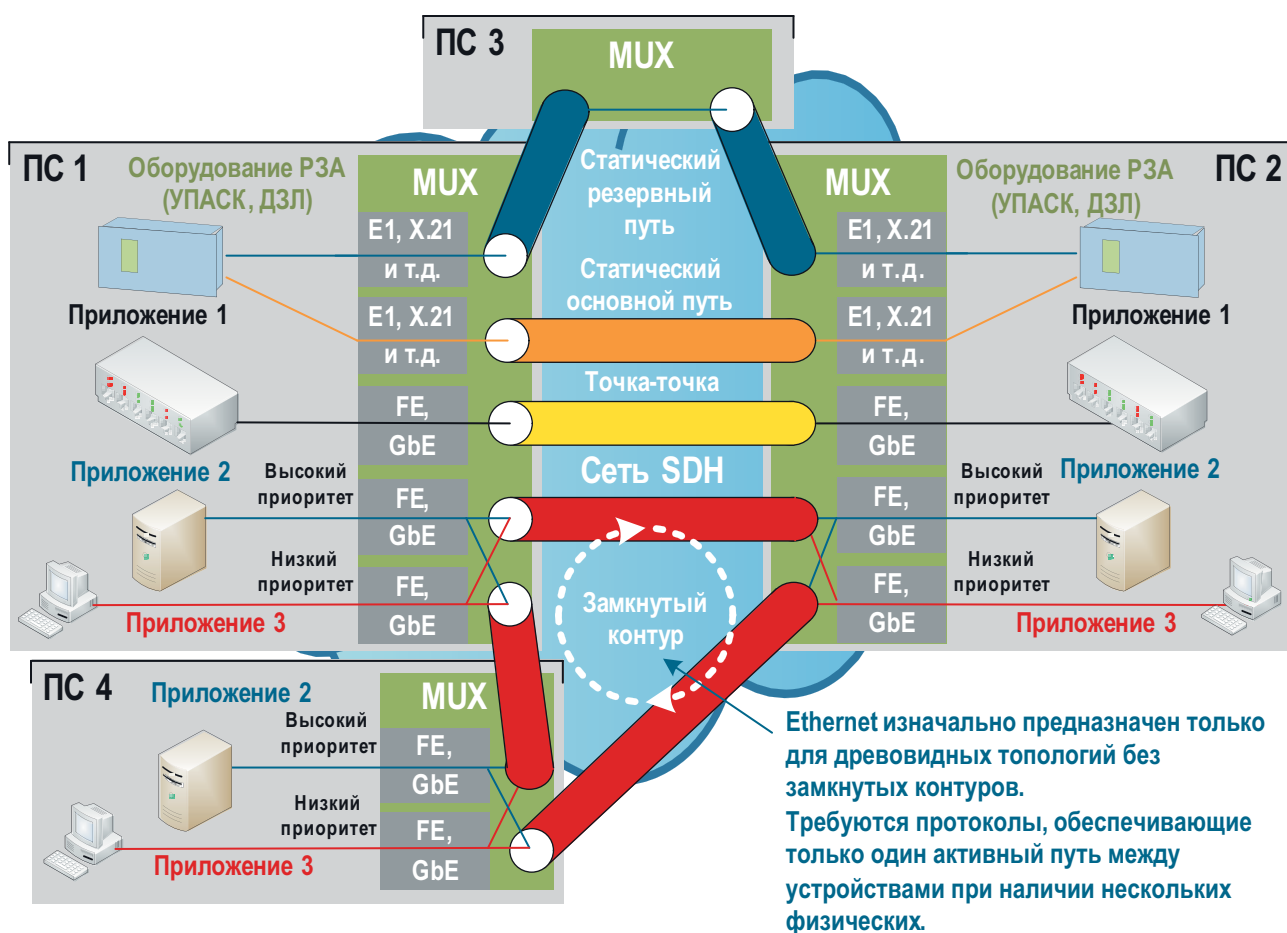


Рис. 1. Каналы РЗА и Ethernet в сетях SDH/PDH

лов. Например, как показано на рис. 1, для Приложения 1 с интерфейсами Fast Ethernet (FE – Ethernet со скоростью 100 Мбит/с) или Gigabit Ethernet (GbE – Gigabit со скоростью 1000 Мбит/с) организован полностью изолированный канал Ethernet через сеть SDH с гарантированной пропускной способностью. Передача пакетного трафика по данному каналу не зависит от передачи данных по другим каналам Ethernet, РЗА и т.д. Данный подход позволяет не только полностью изолировать корпоративный и технологический пакетные трафики, но и в технологической зоне при необходимости реализовать отдельные независимые каналы с гарантированной полосой для разных технологических систем.

Пакетный трафик часто неравномерно распределен по времени и имеет пульсирующий характер, и при этом неэффективно выделять для одного приложения, особенно с малой активностью, отдельный канал с заданной полосой, так как большую часть времени он будет “простаивать”. В данном случае несколько приложений могут использовать один канал с множественным доступом, например, как Приложение 2 и Приложение 3 на рис. 1. Здесь между тремя мультиплексорами организованы общие каналы Ethernet для высокоприоритетного Приложения 2 и низкоприоритетного Приложения 3, а не полностью изолированные, как для Приложения 1. Следует отметить, что изначально протокол Ethernet предназначен только для древовидных топологий сетей и не предполагает замкнутых контуров, пример чего показан на рис. 1.

Для их исключения необходимо использование протоколов, которые обеспечивают только один активный путь между устройствами при наличии нескольких физических. В канале с множественным доступом между разными пользователями всегда есть взаимное влияние. Если высокоприоритетный трафик займет всю полосу канала, то низкоприоритетный передаваться не будет. Низкоприоритетный трафик также будет оказывать влияние на передачу высокоприоритетного, например, вносить дополнительную задержку.

В настоящее время в российской электроэнергетике идет внедрение систем синхронизированных векторных измерений. Устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ), или Phasor Measurement Units (PMU), устанавливаются на наиболее важных для наблюдения объектах энергосистемы (рис. 2). Все УСВИ синхронизированы от сигналов спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS (Глобальная навигационная спутниковая система/Глобальная система определения координат) или по сети с использованием Precision Time Protocol (PTP – Протокол точного времени) [5]. В УСВИ вычисляются векторы напряжений и токов, частота сети и другие данные, которые передаются через ЦСПИ в диспетчерские центры. С УСВИ, работающих offline, данные архивов измерений по мере необходимости периодически передаются по сети с использованием File Transfer Protocol (FTP – Протокол передачи файлов). Online УСВИ постоянно передают пакетные данные с использованием не гарантирующего их доставку протокола UDP/IP (UDP – Протокол диаграмм пользователя), что предъявляет высокие требования к надежности канала связи, а управление online УСВИ, например изменение их уставок, осуществляется с помощью протокола TCP/IP (TCP – Протокол управления передачей) [6].

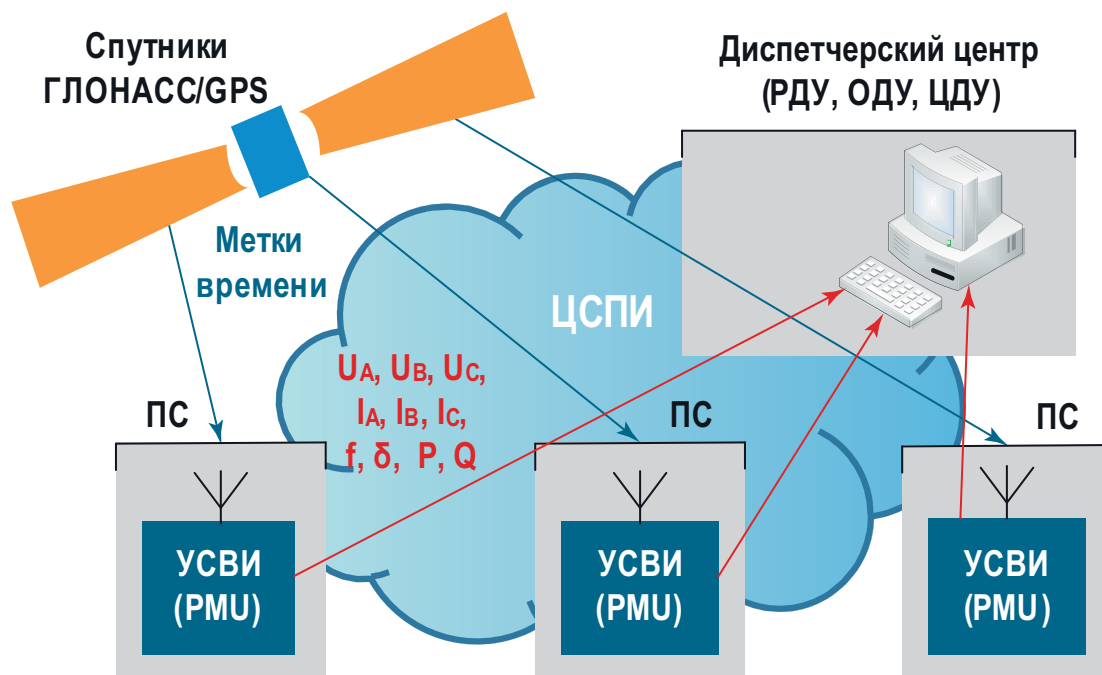


Рис. 2. Система синхронизированных векторных измерений

Получаемые с УСВИ синхронизированные векторные измерения с частотой до 50 Гц (иногда 200 Гц, планируется увеличение до 300–600 Гц) используются в системах мониторинга переходных режимов (СМПП), или Wide Area Monitoring Systems (WAMS), для

- аналитических и расчетных приложений с использованием архивной информации (верификация расчетных моделей, расследование аварий, уточнение характеристик энергосистем и т.д.);
- мониторинга и контроля режимов работы энергосистем в режиме реального времени (визуализация динамики изменения режимных параметров, оценивание состояния и т.д.).

Согласно [7, 8] УСВИ должны быть установлены

- на всех подстанциях напряжением 500 кВ и выше;
- на всех электростанциях установленной мощностью 500 МВт и более.

На конец мая 2014 г. в России было установлено 272 УСВИ и 53 комплекса СМПП, к концу 2015 г. планируется ввод более 400 УСВИ и более 80 СМПП, а к 2020 г. – более 1000 УСВИ и более 200 СМПП [9].

В ближайшей перспективе планируется создание систем противоаварийной автоматики (ПА) на основе использования данных УСВИ с передачей управляющих воздействий (команд ПА) на исполнительные устройства, или Wide Area Monitoring, Protection and Control Systems (WAMPACS – Распределенная система мониторинга, защиты и управления). Требования к быстродействию функционирования систем, использующих синхронизированные векторные измерения, приведены в таблице (данные ОАО “СО ЕЭС”).

#### Требования к быстродействию систем, использующих данные УСВИ

Режим работы УСВИ	Система	Приложение	Быстродействие
Offline	Автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ) Система автоматического управления (САУ)	Расчетные задачи	Не регламентируется
Online		Советчик технолога	< 5 с
		Режимная автоматика	< 1 с
		Противоаварийная автоматика	<< 1 с (20–100 мс)

Очевидно, что для достижения требуемого быстродействия и надежности систем ПА с использованием данных УСВИ требуются каналы Ethernet с гарантированной пропускной способностью и обеспечением бесшовного резервирования с “нулевым” временем переключения. Обеспечение резервирования именно по ЦСПИ здесь особенно актуально, так как организовать резервные каналы с использованием высокочастотной (ВЧ) связи по линиям электропередачи (ЛЭП), как это часто делается для УПАСК, в данном случае невозможно. Причина в том, что каналы Ethernet по ВЧ-трактам обладают рядом недостатков:

- ограниченная скорость передачи данных, увеличение которой требует большой полосы рабочих частот, что на практике осуществить крайне затруднительно (свободных частот практически не осталось);

- недопустимо большая задержка в ВЧ-каналах;
- отказ каналов из-за увеличения затухания ВЧ-трактов при коротких замыканиях на ЛЭП и прерывание передачи данных при больших импульсных помехах (работа основного коммутационного оборудования, грозовые разряды и т.д.).

Использование сетей на базе коммутаторов Ethernet и маршрутизаторов IP/Ethernet для построения каналов РЗА ограничено сложностями организации в них основного и резервного каналов по статическим путям с заданными стабильными задержками и пропускными способностями. Как ранее уже отмечалось, сама природа протокола Ethernet не предполагает наличия замкнутых контуров в сети, тем самым запрещая построение резервных каналов. Классический подход для разрешения данного противоречия – использование специальных протоколов, которые обеспечивают наличие только одного активного пути между устройствами при физическом наличии нескольких. Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP – Быстрый протокол связующего дерева) основан на мониторинге линий связи в сетях с произвольной топологией, обнаружении их неисправности и в случае нарушения активного пути переключении на один из доступных резервных путей [10]. При этом время переключения с одного пути на другой составляет примерно 1 с и более, что неприемлемо для РЗА. При использовании RSTP в кольцевых топологиях достигается время переключения примерно 100 мс, что также недопустимо много. Для использования только в кольцевых топологиях был разработан Media Redundancy Protocol (MRP – Протокол резервирования среды) [11], который позволяет обеспечить время переключения 10–200 мс в зависимости от числа коммутаторов, но обеспечение требуемого бесшовного резервирования с “нулевым” временем переключения с активного пути на резервный для него недостижимо.

Широко используемые в сетях IP/Ethernet протоколы маршрутизации более высокого уровня, например Routing Information Protocol (RIP – Протокол маршрутной информации), осуществляющий при прокладке пути в сети оптимизацию по числу переприемов в ней, или более совершенный Open Short Path First (OSPF – Протокол поиска наикратчайшего пути), принимающий решение о выборе пути исходя из доступной полосы канала, имеют еще большее время сходимости при выборе нового пути даже по сравнению с RSTP (десятки секунд в зависимости от топологии и масштаба сети) [10].

Для обеспечения “нулевого” времени восстановления канала предлагается другой подход, относительно не так давно реализованный в Parallel Redundancy Protocol (PRP – Протокол параллельного резервирования) и High-availability Seamless Redundancy (HSR – Протокол бесшовного резервирования с высокой готовностью) [12], которые используют не один активный путь, а два. Основа данного подхода: отправитель посылает одновременно пакетные данные по двум активным путям, а получатель с помощью протокола резервирования принимает первый пришедший пакет и отклоняет второй. Такой подход позволяет обеспечить практически “нулевое” время восстановления при отказе одного из активных путей, если задержка в них примерно одинакова. PRP использует две параллельные независимые сети с произвольной топологией, что показано на рис. 3. В случае отказа пути в одной из сетей данные будут передаваться по другой.

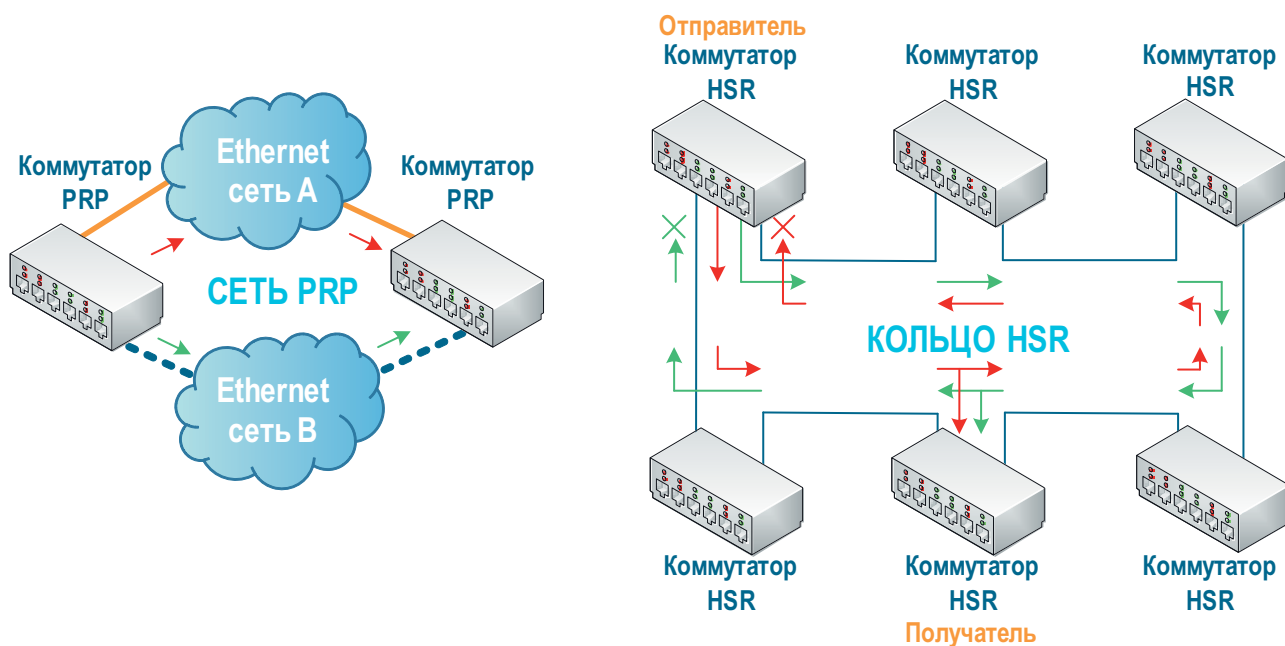


Рис. 3. Резервирование с двумя активными путями в PRP и HSR

HSR предназначен только для кольцевых топологий, и в нем данные параллельно отправляются в двух направлениях по и против часовой стрелки (см. рис. 3), организуя два активных пути. В случае обрыва кольца в одном месте данные до получателя будут приходить по оставшемуся работоспособному активному пути.

PRP позволяет организовывать сети с высокой готовностью, но требует больших затрат на оборудование и инфраструктуру. Использование его для связи между объектами проблематично, так как практически между ними надо создавать две отдельные независимые сети. HSR позволяет реализовывать кольцевые топологии, по которым с целью резервирования передается двукратный объем трафика, и поэтому его использование при организации связи между объектами неэффективно (бесшовное резервирование будет осуществляться для всего передаваемого по сети трафика, что не требуется). PRP и HSR сложны в реализации на больших скоростях передачи данных. Поэтому основной областью использования PRP и HSR являются внутриобъектовые сети Ethernet с высокой надежностью, например, для передачи GOOSE-сообщений (GOOSE – Общие объектно-ориентированные события на подстанции) на цифровых подстанциях на базе IEC 61850 [13].

Следует отметить, что все указанные выше протоколы не могут обеспечить гарантированные пропускные способности каналов, что необходимо для РЗА.

С использованием дополнительного оборудования сети SDH/PDH позволяют организовать высоконадежные каналы Ethernet для систем РЗА с гарантированной пропускной способностью и бесшовным резервированием по статическим путям (рис. 4).

Устройство резервирования PRP RedBox (Redundancy Box – Устройство резервирования) позволяет реализовать канал Ethernet с бесшовным резервированием по статическому основному и резервному путям в сетях SDH/PDH. В данном случае PRP использует не две отдельные неза-

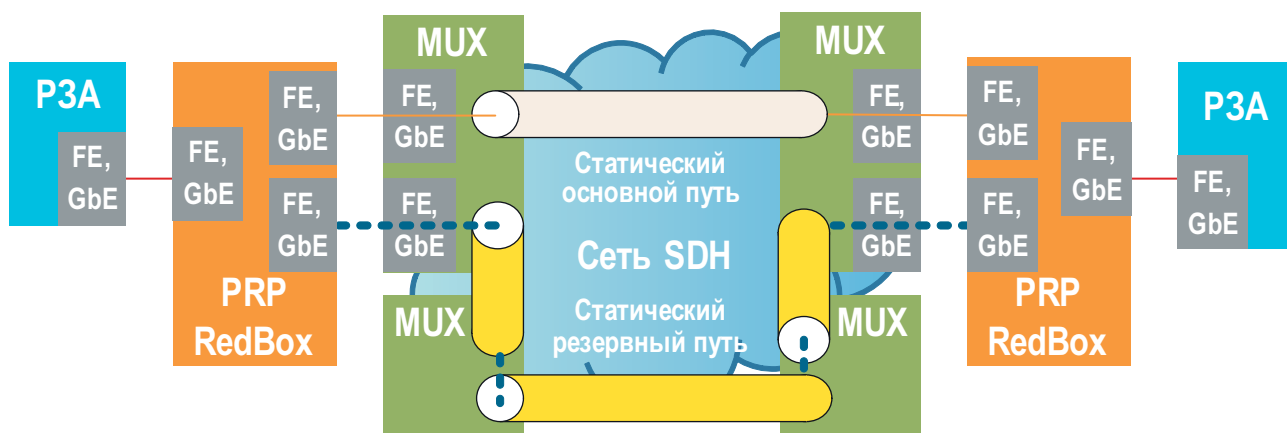


Рис. 4. Канал Ethernet для P3A с бесшовным резервированием по статическим маршрутам в сети SDH/PDH с использованием PRP RedBox

висимые сети, а два изолированных канала Ethernet в сети SDH/PDH по статическим путям с гарантированными пропускными способностями. В настоящее время наблюдается тенденция поддержки новыми устройствами P3A PRP, и резервирование каналов для них по сетям SDH/PDH уже не потребует использования PRP RedBox.

Таким образом, сети SDH/PDH обеспечивают возможность бесшовного резервирования каналов Ethernet с гарантией пропускной способности, в том числе и для перспективных систем ПА с использованием данных УСВИ.

На данный момент организация передачи пакетного трафика и других данных по сетям SHD/PDH удовлетворяет потребностям электроэнергетики. С развитием активно-адаптивных сетей (Smart Grid), в том числе и с возобновляемой распределенной генерацией, доля пакетных данных в ЦСПИ электроэнергетики будет возрастать. Возможно, что при этом эффективность использования доступной полосы сетей SDH/PDH будет падать и возникнет необходимость поиска решений на базе других технологий. Объективных исследований данного вопроса применительно к существующим и перспективным приложениям электроэнергетики с учетом их специфики в настоящее время нет.

Но уже сегодня ряд компаний предлагает для электроэнергетики решения на базе используемых у операторов связи технологий пакетной коммутации. Ими иногда позиционируется, что каналы для всех систем электроэнергетики, включая P3A, станут лучше и эффективней, чем в сетях SDH/PDH. Аргументация такова – если у операторов связи лучше и эффективнее, то так должно быть и везде, в том числе и в любых технологических сетях и системах. При этом совершенно не учитывается следующее:

- требования по надежности каналов технологической зоны (прерывание некоторых сервисов для пользователей сетей операторов связи на несколько секунд и даже десятков секунд не очень критично);
- требования к задержке в каналах, ее стабильности и симметрии в разных направлениях каналов P3A [2];



- цикл реконструкции объектов в электроэнергетике значительно превышает время жизни устройств абонентов операторов связи, что приводит к необходимости поддержки традиционно используемых интерфейсов и протоколов в установленном на ее объектах оборудовании и системах (например, каналы с использованием технологии Voice over IP (VoIP – Речь по IP/IP-телефония) не поддерживают передачу сигналов АДАСЭ и низкоскоростных модемов ТМ с ЧМ);
- проблемы обеспечения информационной безопасности (ИБ) [14];
- неопределенность границ применения различных технологий и протоколов пакетной коммутации при организации каналов технологической зоны;
- отсутствие принципов построения каналов РЗА по сетям с пакетной коммутацией;
- отсутствие методик испытаний каналов, использующих различные технологии и протоколы пакетной коммутации как каналов технологической зоны (например, в отличие от сетей SDH/PDH, где взаимное влияние между каналами отсутствует, здесь необходимо проверять работу высокоприоритетных каналов с жесткими требованиями к надежности при штормовых нагрузках в сети);
- неготовность энергопредприятий, в том числе служб РЗА, к эксплуатации решений на базе новых технологий (отсутствие высококвалифицированного персонала, приборов и т.д.).

Организация каналов РЗА при передаче большого объема пакетного трафика может быть реализована использованием мультиплексов с гибридной системной платой (рис. 5), на которой присутствуют две шины: TDM и Ethernet, например, FOX615 компании ABB и т.д. Данное устройство представляет собой SDH/PDH-мультиплексор (шина TDM) и Ethernet/IP-коммутатор/маршрутизатор (шина Ethernet) с функцией межсетевого обмена. Соответственно пакетный трафик передается через шину Ethernet, а данные синхронных интерфейсов через шину TDM.

Недостатки данного решения:

- увеличение затрат на инфраструктуру: или удвоение числа оптических волокон в кабелях между объектами, или использование технологии Wave Division Multiplexing (WDM –

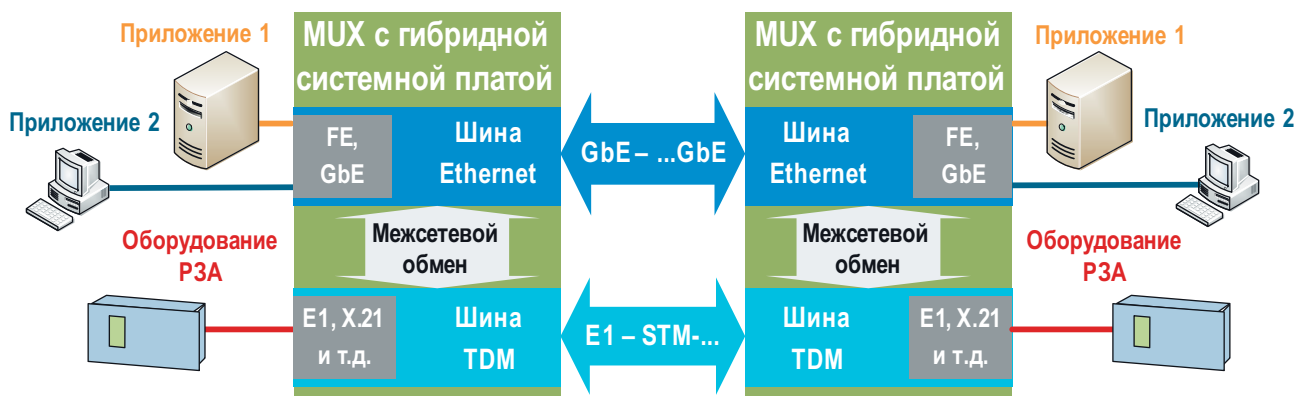


Рис. 5. Мультиплексор с гибридной системной платой

Волновое уплотнение каналов), или установка оборудования Optical Transport Network (OTN – Оптическая транспортная сеть);

- по сравнению с построением отдельных сетей SDH/PDH и сетей с пакетной коммутацией:
  - ограниченная функциональность;
  - увеличение себестоимости в ряде проектов;
  - меньшая надежность и безопасность.

Операторы связи рассматривают данное решение как промежуточное при миграции от SDH/PDH к технологиям пакетной коммутации, экономические и технические перспективы которого сомнительны.

Технология пакетной коммутации Multi-protocol Label Switching (MPLS – Многопротокольная коммутация с помощью меток) [10] считается рядом специалистов в области телекоммуникаций одной из самых перспективных и позволяет обеспечить надежность каналов, которая приближается к надежности каналов в технологии SDH/PDH. Наряду с передачей пакетного трафика маршрутизаторы MPLS поддерживают интерфейсы G.703.1, X.21, E1, RS-232 и реализацию телефонных каналов с ИКМ без использования VoIP, что делает возможным их использование как каналов для уже эксплуатируемого на объектах оборудования с традиционными интерфейсами и протоколами. При отказах основных путей собственные механизмы резервирования сетей MPLS обеспечивают переключение на резервные за время до 50 мс. В них существует потенциальная возможность организации основных и резервных каналов с гарантированной пропускной способностью по статическим путям (рис. 6).

ЗАО «Юнител Инжиниринг» провело в сетях MPLS измерения задержек и их симметрии в каналах с электрическими интерфейсами E1, в том числе при штормовых нагрузках (рис. 7). Результаты показали, что при соответствующих настройках маршрутизаторов MPLS задержки и их симметрия приемлемы как для УПАСК, так и для ДЗЛ. Но следует отметить, что накладные расходы при реализации высоконадежных каналов с гарантированной полосой многократно превышают скорость передачи данных на интерфейсах пользователя. Это ставит вопрос о сте-

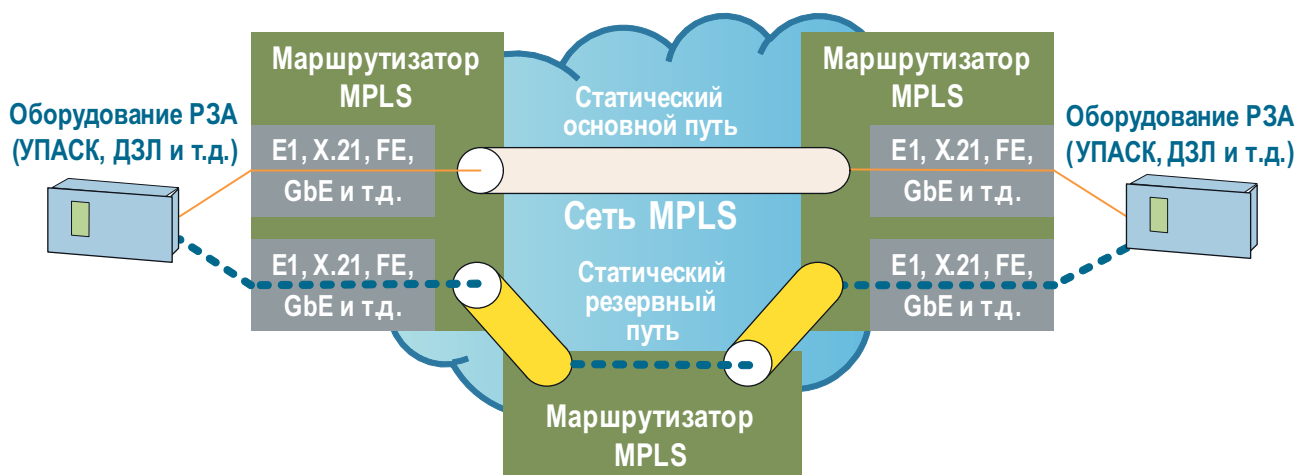


Рис. 6. Резервирование каналов по статическим путям в сети MPLS

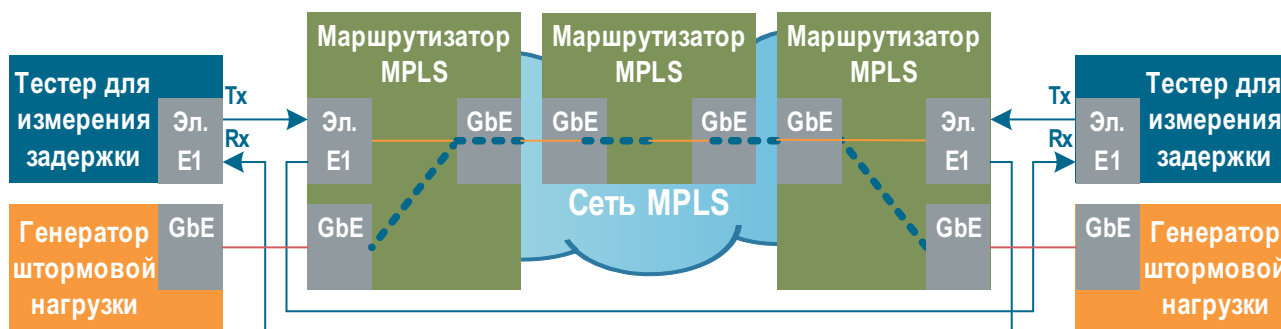


Рис. 7. Измерение задержек каналов E1 в сети MPLS в разных направлениях

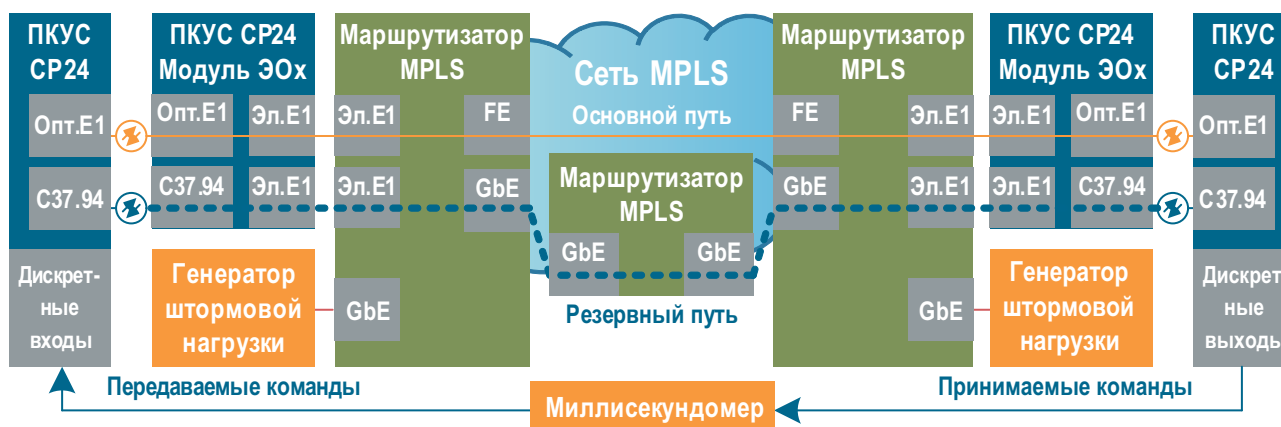


Рис. 8. Подключение УПАСК ПКУС СР24 к сети MPLS для проверки его работы, в том числе бесшовного переключения между основным и резервными путями

пени эффективности использования доступной полосы в сетях MPLS при большом числе каналов для РЗА.

Проведено тестирование работы по сетям MPLS оборудования из семейства ПКУ разработки и производства ЗАО “Юнител Инжиниринг” (рис. 8). ПКУС СР24 – устройство, объединяющее УПАСК и промежуточную панель с ключами ввода/вывода команд РЗ и ПА в одном конструктиве [15]. ПКУС СР24 Модуль ЭОх – преобразователь интерфейсов для подключения УПАСК и ДЗЛ с оптическими интерфейсами С37.94 и E1 к оборудованию ЦСПИ с электрическими интерфейсами E1.

Испытания, как при штормовой нагрузке, так и без нее, показали, что физическое прерывание одного из каналов не приводит к прерыванию постоянно передаваемых ПКУС СР24 команд РЗ и ПА, т.е. обеспечивается бесшовное резервирование с “нулевым” временем переключения.

ЗАО “Юнител Инжиниринг” провело тестирование работы терминалов ДЗЛ через сеть MPLS по схеме, приведенной на рис. 9.

Испытания показали соответствие величины задержки, ее симметрии и стабильности требуемым значениям как при штормовой нагрузке, так и без нее. При прерывании одного из маршрутов работа терминалов ДЗЛ осуществлялась через другой.

Следует отметить, что в отличие от сетей SDH/PDH несанкционированное изменение конфигурации каналов РЗА в сетях MPLS может быть обнаружено далеко не сразу. Например,



Рис. 9. Подключение терминалов ДЗЛ к сети MPLS с прогрузкой токовых цепей для оценки влияния асимметрии каналов на погрешность вычисления дифференциального тока

несанкционированное изменение приоритета канала РЗА с высокого на низкий будет проявляться только при штормовых нагрузках в сети. Поэтому проблема обеспечения ИБ здесь особенно актуальна.

### Заключение

При возрастании объемов пакетного трафика в электроэнергетике альтернативой сетям SDH/PDH в ней могут служить сети MPLS, которые обеспечивают:

- поддержку традиционно используемых интерфейсов и протоколов;
- построение высоконадежных каналов для РЗА с требуемыми параметрами.

Для окончательного подтверждения данной возможности, прежде всего, необходимы:

- объективные исследования преимуществ и недостатков сетей MPLS по сравнению с SDH/PDH при учете специфики существующих и перспективных приложений;
- проведение испытаний маршрутизаторов MPLS разных типов на предмет возможности организации каналов технологической зоны, так как реализация высоконадежных каналов в них отличается, причем даже у одного типа маршрутизаторов с разными версиями встроенного программного обеспечения (разными “прошивками”);
- выработка общих принципов построения в сетях MPLS каналов технологической зоны, в том числе для РЗА, и разработка методик их проверки;
- проверка маршрутизаторов MPLS на отсутствие незадекларированных возможностей (использование только доверенного оборудования), без чего в принципе невозможно обеспечение ИБ каналов технологической зоны.

Без решения обозначенных выше вопросов с привлечением широкого круга специалистов, и не только в области телекоммуникаций, внедрение сетей MPLS вместо SDH/PDH в электроэнергетике несет много потенциальных рисков.

## Список литературы

1. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1997.
2. Харламов В.А. Реализация цифровых каналов технологической связи для РЗА и ПА // Воздушные линии. 2013. № 2. С. 53–58.
3. ГОСТ Р МЭК 60870-5-104-2004. Устройства и системы телемеханики. Часть 5. Протоколы передачи. Раздел 104. Доступ к сети для ГОСТ Р МЭК 870-5-101 с использованием стандартных транспортных профилей. М.: Госстандарт, 2004.
4. ITU-T Recommendation G.707/Y.1322 (01/2007). Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH).
5. IEEE 1588-2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
6. IEEE C37.118.2-2011. IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems.
7. ГОСТ Р 55105-2012. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. М.: Госстандарт, 2012.
8. Приказ Минэнерго России № 309 от 19 июня 2013 г. Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2014–2019 годы.
9. Развитие задач мониторинга и управления в ЕЭС России на базе системы мониторинга переходных режимов / А.В. Жуков, Д.М. Дубинин, О.Л. Опалев, Д.Н. Уткин // Сборник докладов XXII конф. “Релейная защита и автоматизация энергосистем”. М.: ВВЦ, 27–29 мая 2014. С. 452–462.
10. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010.
11. IEC 62439-2 ed1.0: 2010. Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 2: Media Redundancy Protocol (MRP).
12. IEC 62439-3 ed2.0: 2012. Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR).
13. Результаты исследований коммуникационной сети “цифровой подстанции” на цифровых коммутаторах различных производителей / М.В. Вазюлин, С.Г. Попов, А.А. Кузьмин, С.А. Перегудов, А.А. Сердцев // Сборник докладов XXII конф. “Релейная защита и автоматизация энергосистем”. М.: ВВЦ, 27–29 мая 2014. С. 400–406.
14. Романов С., Харламов В. Эшелонированная оборона. Универсальность и безопасность каналов технологической связи // Энергонадзор. 2014. № 1/2. С. 28–29.
15. Харламов В.А. Современные решения по организации цифровых каналов связи для РЗА и ПА // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 4. С. 11–21.