Промышленные Ethernet-сети для электроэнергетики:

IEC 61850, резервирование, MMS, GOOSE, PTP, SyncE, PRP, HSR, RedBox, TSN и требования к коммутаторам.

ИЗДАТЕЛЬ:
ООО «ДИДЖИКОМ»

Адрес: Россия, 117535, г. Москва, Варшавское шоссе, дом 133, строение 2

Тел: +7 (499) 969-81-21
Эл. почта: sales@dgsys.ru
Сайт: www.dgsys.ru

Версия: 1.0 2026 г.

© Запрещается полное или частичное копирование данной документации, её рецензирование в любой форме, без согласования с ООО «ДИДЖИКОМ»

Оглавление

1. Особенности Ethernet-сетей для электроэнергетики ... 3
2. IEC 61850 как основа цифровой подстанции ... 4
Взаимосвязь основных частей ... 5
3. MMS, GOOSE и Sampled Values ... 6
MMS: диспетчерский и управляющий обмен ... 6
GOOSE: быстрая передача событий ... 6
Sampled Values: потоковые измерительные данные ... 7
4. Синхронизация времени: энергетический профиль PTP и SyncE ... 8
5. Резервирование сети: PRP, HSR, MRP и RSTP ... 9
5.1. PRP: две параллельные независимые сети ... 10
5.2. HSR: резервирование внутри кольца ... 11
5.3. MRP: восстановление промышленного кольца ... 13
5.4. RSTP: резервирование произвольной Ethernet-топологии ... 14
5.5. Сравнение протоколов резервирования ... 14
6. RedBox и взаимодействие с коммутаторами ... 15
6.1. Назначение RedBox ... 15
6.2. Варианты применения ... 16
6.3. Требования к RedBox и коммутатору с функцией RedBox ... 17
6.4. RedBox как потенциальная точка отказа ... 18
7. Типовая комплексная архитектура сети подстанции ... 18
7.1. Комплексная схема подстанции ... 18
7.2. Функциональные уровни подстанционной сети ... 20
7.3. Станционная шина на основе PRP ... 21
7.4. Процессная шина на основе HSR ... 22
7.5. Сервисные сегменты на основе MRP или RSTP ... 22
7.6. Схема 1. PRP на станционной шине и отдельные HSR-кольца присоединений ... 23
7.7. Схема 2. PRP как общая магистраль и HSR как локальные ответвления ... 26
7.8. Схема 3. Полностью PRP-резервированная подстанция ... 27
7.9. Схема 4. MRP для сервисной сети ... 28
7.10. Схема 5. RSTP/MSTP для административной и общей инфраструктуры ... 29
7.11. Синхронизация в комплексной сети ... 29
7.12. Сравнение уровней комплексной сети ... 31
7.13. Анализ отказов комплексной схемы ... 31
7.14. Требования к коммутаторам по сегментам ... 33
7.15. Основные проектные ошибки ... 33
7.16. Практический вариант для крупной цифровой подстанции ... 34

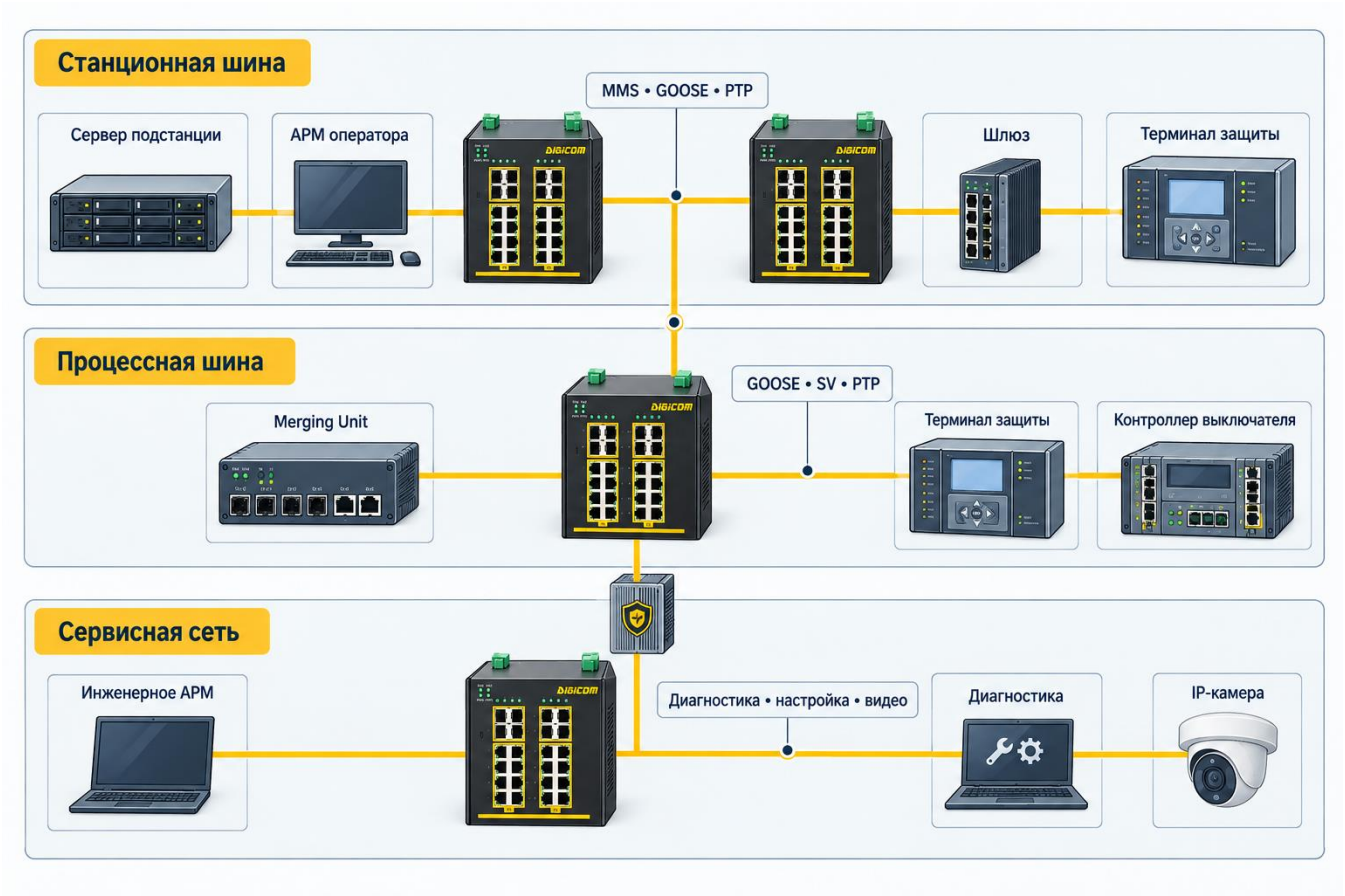
8. Требования к промышленным коммутаторам разных уровней подстанции 35
8.1. Конструктивное исполнение и условия эксплуатации 35
8.2. Производительность и задержка 36
8.3. VLAN, QoS и многоадресный трафик 36
8.4. Синхронизация времени 36
8.5. Управление, диагностика и информационная безопасность 37
8.6. Коммутатор станционной шины 37
8.7. Коммутатор процессной шины 38
8.8. Коммутатор сервисной сети 38
8.9. Сравнение требований по уровням сети 39
9. Применение TSN в электроэнергетике 40
9.1. Назначение TSN 40
9.2. Основные механизмы TSN 40
9.3. Синхронизация IEEE 802.1AS и профиль IEC 61850-9-3 41
9.4. Передача по расписанию IEEE 802.1Qbv 42
9.5. Прерывание низкоприоритетных кадров 42
9.6. Контроль отдельных потоков IEEE 802.1Qci 43
9.7. FRER по IEEE 802.1CB 43
9.8. Заменяет ли TSN протоколы PRP, HSR, MRP и RSTP 44
9.9. Требования к TSN-коммутатору для энергетики 45
10. Подстанционная сеть как единая инженерная система 46
10.1. Взаимосвязь технологий 46
10.2. Последовательность проектирования 47
10.3. Роль производителя подстанционных коммутаторов 48
10.4. Итог 48
11. Оборудование DIGICOM для Ethernet-сетей электроэнергетики 49
11.1 Промышленные коммутаторы L2/L3 для электроэнергетики 49
11.2 Коммутаторы для стационной шины 52
11.3 Коммутаторы для процессной шины 55
11.4 Коммутаторы для сервисной сети 61
11.5 Устройства RedBox 65
11.6 Серверы и преобразователи точного времени 66
12. Словарь терминов и сокращений 67
Техническая поддержка 0

1. Особенности Ethernet-сетей для электроэнергетики

Современная подстанция представляет собой распределённую систему, в которой устройства релейной защиты, автоматики, измерения, управления и диагностики обмениваются данными по Ethernet. Через общую сетевую инфраструктуру могут одновременно передаваться команды отключения выключателей, результаты измерений, сообщения о состоянии оборудования, архивы событий, данные систем диспетчерского управления и служебный трафик.

Требования к этим потокам заметно различаются. Передача журнала событий или изменение параметров устройства обычно допускают небольшую задержку. Команда противоаварийной автоматики должна поступить адресатам за строго ограниченное время. Потоки оцифрованных токов и напряжений передаются непрерывно и создают значительную нагрузку на сеть. Следовательно, пропускная способность коммутатора сама по себе ещё не характеризует его пригодность для подстанции. Важны задержка кадров, её стабильность, работа очередей при перегрузке, скорость обработки многоадресного трафика и поведение сети при повреждении линии связи.

В зависимости от назначения на подстанции выделяют несколько сетевых уровней. Станционная шина (Station Bus) связывает терминалы присоединений, серверы, автоматизированные рабочие места, контроллеры и шлюзы. Процессная шина (Process Bus) используется для обмена данными между измерительными устройствами, терминалами защит и оборудованием первичного процесса. Отдельные сервисные сегменты применяются для настройки, диагностики, видеонаблюдения и других вспомогательных систем. Границы между этими сетями зависят от проекта, но требования к задержке, резервированию и синхронизации на каждом уровне различаются.



Для разделения потоков применяются виртуальные локальные сети (Virtual Local Area Network, VLAN). Критическому трафику назначаются повышенные приоритеты с использованием механизмов качества обслуживания (Quality of Service, QoS). При этом приоритетная очередь требует правильной настройки: чрезмерный объём высокоприоритетного трафика способен вытеснить остальные данные и нарушить работу сети. Проектировщик должен учитывать состав потоков, их периодичность, размеры кадров и возможное увеличение нагрузки при аварийных событиях.

Большая часть сообщений IEC 61850 распространяется по многоадресной схеме. Один источник публикует кадры, предназначенные сразу для нескольких получателей. Коммутатор должен корректно обрабатывать такие потоки и ограничивать их распространение пределами нужного сегмента. Иначе многоадресные кадры будут поступать на лишние порты, занимать полосу пропускания и создавать дополнительную нагрузку на подключённые устройства.

Отдельную группу образуют требования к надёжности. Обрыв кабеля, отказ порта или выход коммутатора из строя не должны приводить к недопустимо долгому перерыву связи. В зависимости от назначения сети используются параллельное резервирование, резервирование кольца или перестроение топологии. Некоторые механизмы передают дублированные кадры по независимым путям, другие активируют запасной маршрут после обнаружения повреждения. Выбор технологии влияет на топологию, количество оборудования, расход полосы и время восстановления.

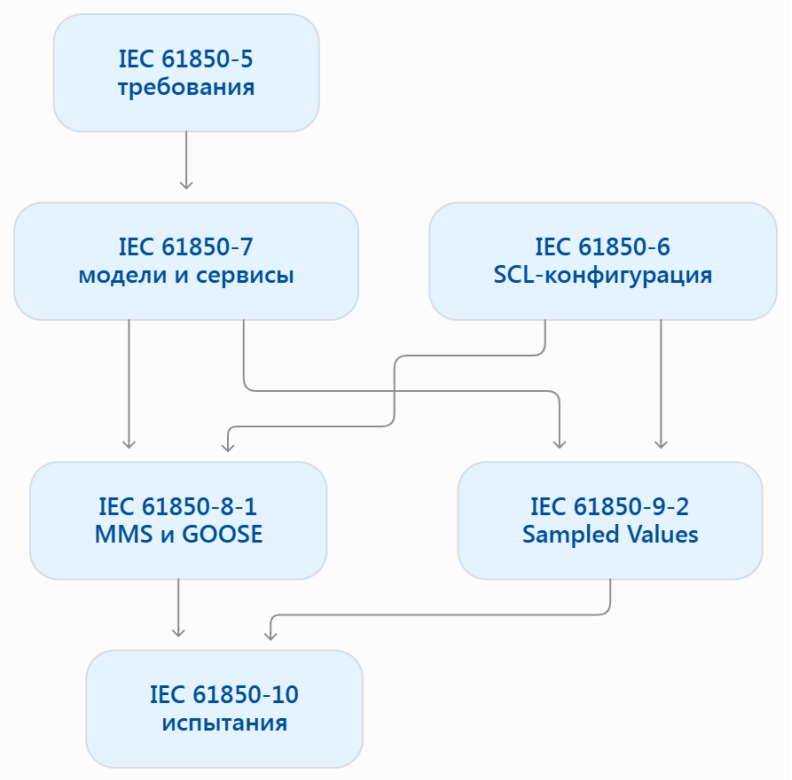
Условия эксплуатации также отличаются от условий серверной или офисного помещения. Коммутаторы могут находиться рядом с силовыми цепями и коммутационным оборудованием, где возникают электромагнитные помехи, электростатические разряды, импульсные перенапряжения и провалы питания. Оборудование должно сохранять работоспособность при заданных температурах, влажности, вибрации и механических воздействиях.

Для подстанционных коммутаторов обычно применяются металлические корпуса, безвентиляторное охлаждение, промышленные разъёмы питания и оптические интерфейсы. В ответственных узлах предусматриваются два независимых ввода питания и релейная сигнализация аварий. Конкретный набор функций и конструктивных решений определяется условиями размещения и категорией обслуживаемой системы.

2. IEC 61850 как основа цифровой подстанции

IEC 61850, или МЭК 61850 в русском написании, представляет собой серию взаимосвязанных стандартов для автоматизации электроэнергетических объектов. Она охватывает информационные модели устройств, описание функций, коммуникационные сервисы, передачу сообщений, синхронизацию и инженерное проектирование.

Взаимосвязь основных частей



За счёт единой модели данных разные системы получают согласованные обозначения логических узлов, состояний, измерений и команд. Способ передачи зависит от вида информации и требований к времени доставки. Для обычного клиент-серверного обмена используется MMS, для быстрых событий — GOOSE, для оцифрованных измерительных сигналов — Sampled Values.

С точки зрения промышленного Ethernet-оборудования наибольшее значение имеют следующие документы серии.

IEC 61850-3 содержит общие требования к оборудованию связи и автоматизации, эксплуатируемому на электростанциях и подстанциях. В документе рассматриваются климатические и механические воздействия, электромагнитная совместимость, требования к источникам питания, электрическая прочность изоляции и безопасность. Редакция IEC 61850-3:2013 согласует требования к коммуникационному оборудованию с условиями, установленными для устройств релейной защиты и других интеллектуальных электронных устройств.

Для коммутатора соответствие IEC 61850-3 относится прежде всего к аппаратной платформе и её устойчивости к внешним воздействиям. Такая характеристика сама по себе не подтверждает поддержку GOOSE, PTP, PRP, HSR или других сетевых функций. Каждая из них должна быть реализована и проверена отдельно.

IEC 61850-8-1 определяет отображение коммуникационных сервисов IEC 61850 на службу обмена производственными сообщениями (Manufacturing Message Specification, MMS) и кадры Ethernet. Эта часть охватывает передачу обычных и критичных по времени данных через локальную сеть, включая сообщения GOOSE.

IEC 61850-9-2 описывает передачу потоков выборочных значений (Sampled Values, SV) через Ethernet. Такие потоки используются при построении процессной шины и передаче оцифрованных значений токов и напряжений от измерительных устройств к терминалам защиты, автоматики и учёта.

IEC/IEEE 61850-9-3 задаёт профиль протокола точного времени PTP для автоматизации электроэнергетических объектов. Профиль определяет совместимый способ применения PTP в подстанционной сети и ориентирован на классы синхронизации, используемые в IEC 61850 и связанных стандартах.

IEC TR 61850-90-4 содержит рекомендации по проектированию сетей. В документе рассматриваются передача GOOSE и Sampled Values, пропускная способность, задержки, резервирование, многоадресный трафик, синхронизация и другие вопросы сетевой архитектуры.

Стандарты IEC 61850 не предписывают одну универсальную топологию. Они задают модели взаимодействия и требования к коммуникациям, на основании которых проектируется сеть конкретного объекта. Поэтому два коммутатора в одинаковом промышленном исполнении могут существенно различаться по пригодности для станционной или процессной шины.

3. MMS, GOOSE и Sampled Values

MMS: диспетчерский и управляющий обмен

Служба обмена производственными сообщениями (Manufacturing Message Specification, MMS) используется для клиент-серверного взаимодействия. Клиентом может выступать система диспетчерского управления, сервер подстанции или инженерное рабочее место, а сервером — терминал защиты, контроллер либо другое интеллектуальное электронное устройство.

Через MMS передаются измерения, состояния дискретных сигналов, отчёты, журналы событий, команды управления, параметры и файлы. Обмен работает поверх стека TCP/IP. Механизмы TCP контролируют последовательность данных и повторяют передачу потерянных пакетов, поэтому кратковременная потеря пакета обычно приводит к увеличению задержки, а не к окончательной утрате информации.

По требованиям к времени MMS уступает GOOSE и Sampled Values, хотя задержки остаются важными для операторского управления и диспетчеризации. Коммутатору необходимы стабильная работа таблиц коммутации, поддержка VLAN и QoS, достаточная производительность и средства диагностики. Для управления сетью также применяются журналирование событий, синхронизация внутренних часов, протокол сетевого управления SNMP и контроль состояния портов.

GOOSE: быстрая передача событий

Обобщённые объектно-ориентированные события подстанции (Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE) используются для передачи команд защит, сигналов блокировки, положения коммутационных аппаратов и других событий, требующих малой задержки.

GOOSE работает по модели «издатель — подписчик». Устройство-издатель формирует набор данных и передаёт его группе подписчиков. Сообщения помещаются непосредственно в многоадресные кадры Ethernet канального уровня, без использования IP и TCP. Получатели заранее настраиваются на соответствующие потоки.

Подтверждение доставки для каждого кадра не применяется. После изменения состояния издатель передаёт сообщение несколько раз с короткими интервалами. Затем интервалы постепенно увеличиваются, и сообщения продолжают поступать в фоновом режиме. Счётчики состояния и последовательности позволяют подписчику определить появление нового события, повторную передачу либо пропуск кадров.

Такая схема предъявляет особые требования к коммутатору. Он должен передавать приоритетные кадры с малой и стабильной задержкой, не допускать их блокировки менее важным трафиком и правильно работать при одновременном появлении большого числа событий. Особенно высокая нагрузка возможна

во время аварии, когда несколько устройств почти одновременно начинают передавать GOOSE с минимальными интервалами.

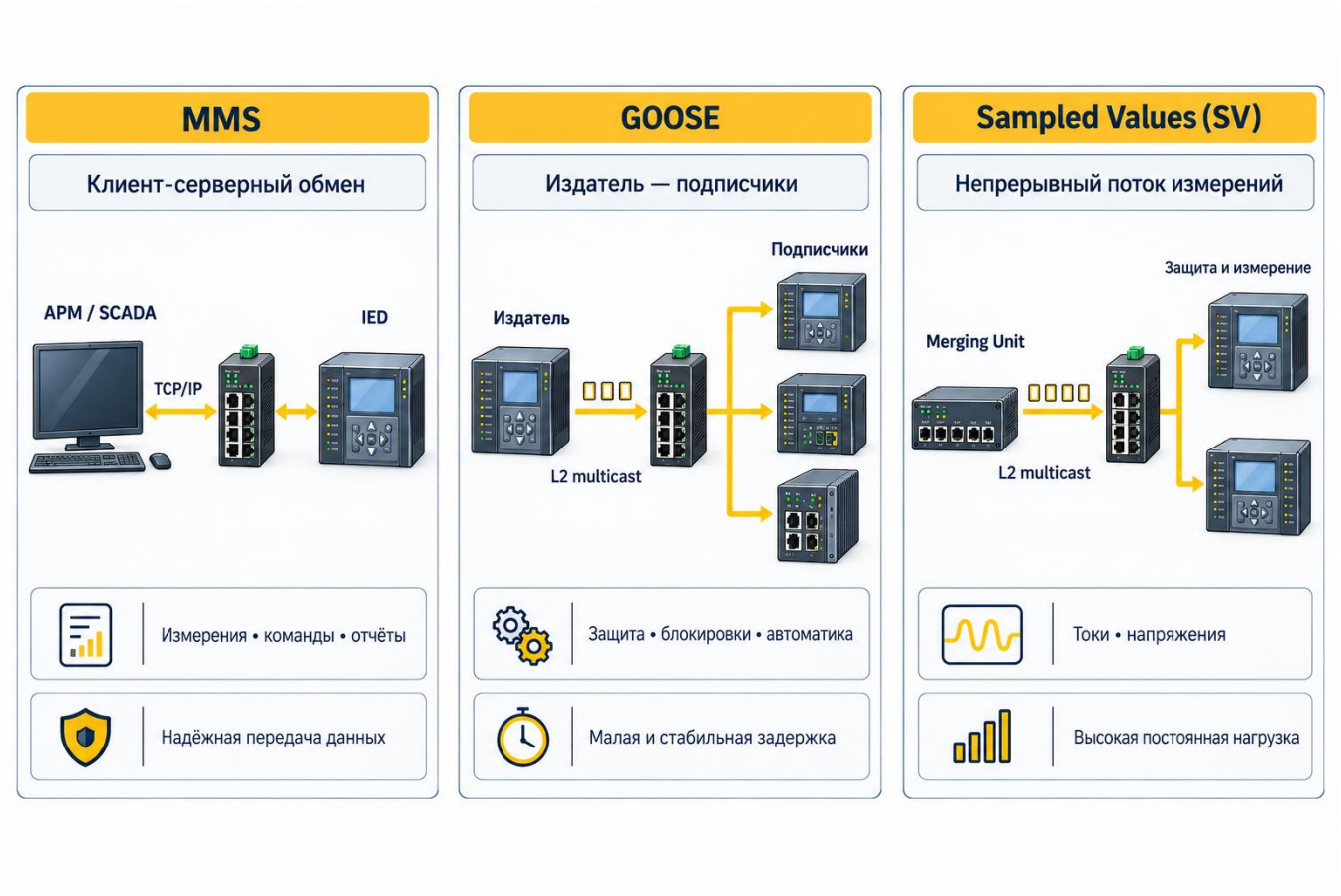
Для разделения потоков используются VLAN и приоритеты IEEE 802.1p. Распространение GOOSE необходимо ограничивать требуемыми портами. Протокол контроля групп многоадресной рассылки IGMP Snooping предназначен для IP multicast и не управляет GOOSE-кадрами канального уровня. Для фильтрации применяются статические записи многоадресных MAC-адресов, регистрация многоадресных потоков либо специализированные функции коммутатора.

Sampled Values: потоковые измерительные данные

Потоки выборочных значений (Sampled Values, SV) содержат последовательности оцифрованных отсчётов токов и напряжений. Источником обычно служит объединяющее устройство (Merging Unit), связанное с трансформаторами тока и напряжения. Получателями выступают терминалы релейной защиты, измерительные системы, счётчики и регистраторы аварийных событий.

SV передаются периодически с высокой частотой и формируют постоянную нагрузку. В отличие от GOOSE, где интенсивность возрастает после события, поток выборочных значений присутствует всё время работы оборудования. Потерянный отсчёт повторно не передаётся, поскольку к моменту повторной доставки он уже потеряет актуальность.

Для процессной шины требуется заранее оценивать количество потоков, их скорость и пути прохождения. Коммутатор должен обрабатывать трафик на полной скорости портов, сохранять низкую задержку и не терять кадры при штатной нагрузке. Размер и организация буферов также имеют значение: слишком большая буферизация увеличивает задержку, а недостаточная ёмкость очередей повышает риск потерь при кратковременных всплесках.



Совместная передача MMS, GOOSE и SV требует продуманной классификации трафика. Обычно GOOSE и SV назначаются отдельные VLAN и высокие приоритеты, а служебный и управляющий обмен помещается в другие очереди. Число очередей само по себе не определяет качество работы. Важны алгоритм их обслуживания, резервирование пропускной способности и поведение коммутатора при перегрузке.

4. Синхронизация времени: энергетический профиль PTP и SyncE

Точная синхронизация используется для сопоставления измерений, регистрации последовательности событий, работы устройств процессной шины, определения места повреждения и анализа аварий. Если часы оборудования расходятся, записи разных устройств сложно свести в единую временную картину. Для некоторых измерительных и защитных функций требования к точности значительно выше, чем для обычного журналирования.

Энергетический профиль протокола точного времени (Precision Time Protocol Power Profile, PTP Power Profile), установленный IEC/IEEE 61850-9-3, определяет согласованные правила применения PTP на объектах электроэнергетики. Источником времени служат ведущие часы (Grandmaster Clock), обычно связанные с глобальной навигационной спутниковой системой или другим эталонным источником.

PTP передаёт по сети сообщения синхронизации и измеряет задержку между узлами. Конечное устройство корректирует свои часы с учётом полученных данных. На точность влияют задержки в линиях связи, обработка пакетов в коммутаторах, асимметрия прямого и обратного путей, изменение топологии и нагрузка на сеть.

Обычный коммутатор пересылает PTP-сообщения вместе с остальным трафиком, а время их нахождения внутри устройства может изменяться. Для более точной синхронизации используются аппаратные метки времени и специальные режимы работы.

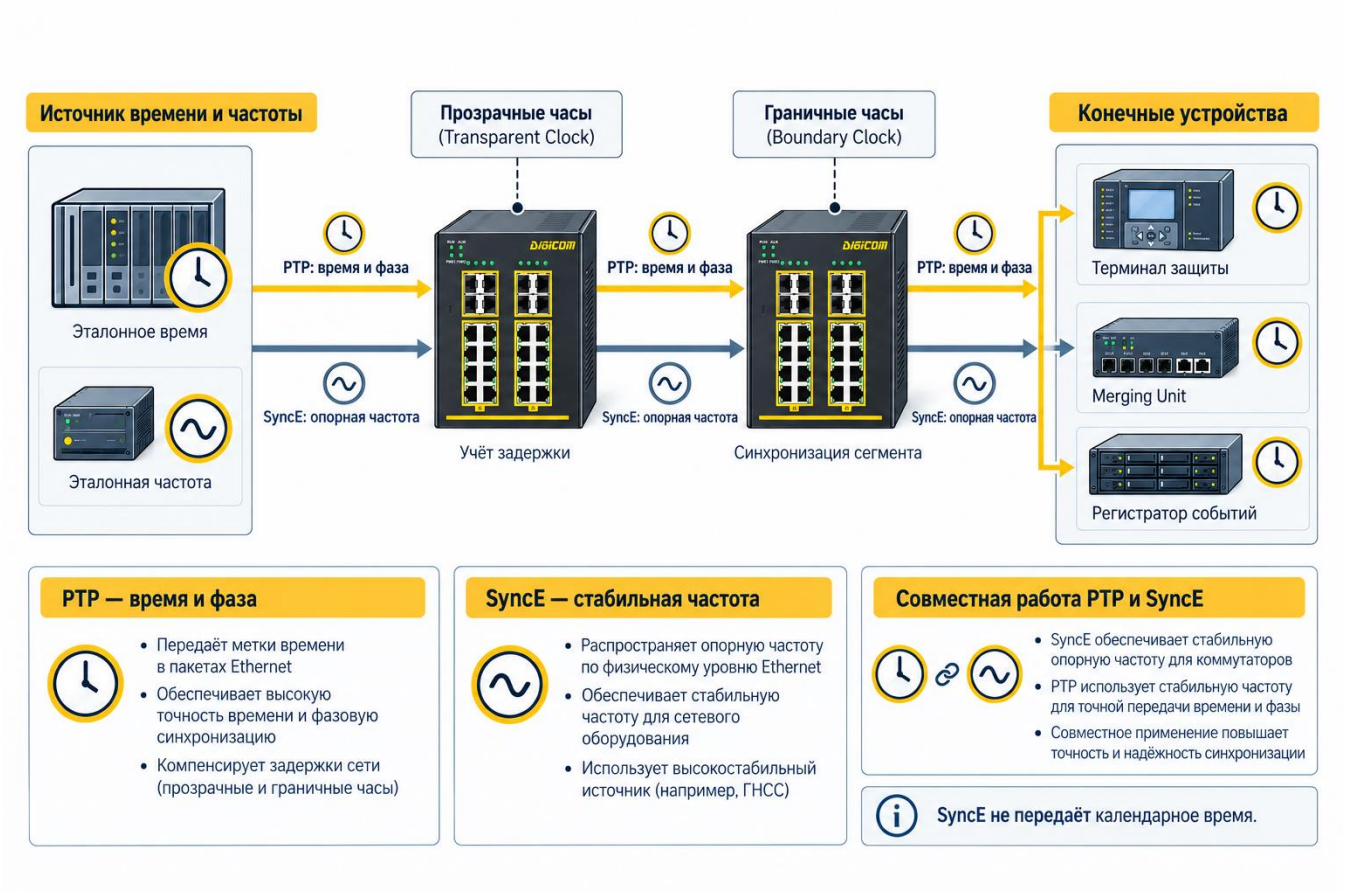
В режиме прозрачных часов (Transparent Clock) коммутатор измеряет время прохождения PTP-сообщения через своё коммутационное ядро и вносит соответствующую поправку. Конечный узел получает сведения о суммарной задержке, накопленной на промежуточных устройствах.

В режиме граничных часов (Boundary Clock) коммутатор синхронизирует собственные часы через один из портов и становится источником PTP для нижележащего участка сети. Каждый сегмент обслуживается отдельным экземпляром обмена, благодаря чему снижается влияние количества переходов и части сетевых задержек.

Выбор режима зависит от топологии и требований проекта. Все устройства тракта должны поддерживать совместимый профиль PTP. Наличие функции IEEE 1588 без указания профиля и аппаратной реализации ещё не подтверждает пригодность коммутатора для IEC/IEEE 61850-9-3. При резервировании также необходимо учитывать смену ведущих часов и изменение путей прохождения сообщений.

Синхронный Ethernet (Synchronous Ethernet, SyncE) решает другую задачу. Он передаёт опорную частоту через физический уровень Ethernet. Коммутатор восстанавливает тактовый сигнал из принимаемого потока и использует его для синхронизации исходящих интерфейсов. Требования к архитектуре частотной синхронизации и сетевым часам приведены в рекомендациях ITU-T G.8261 и G.8262.

SyncE не переносит сведения о календарном времени и фазе. Эти данные передаются через PTP. Совместное применение двух технологий позволяет использовать стабильную физическую частоту SyncE и временные метки PTP. При кратковременном ухудшении передачи PTP стабильная частотная опора уменьшает скорость расхождения локальных часов.



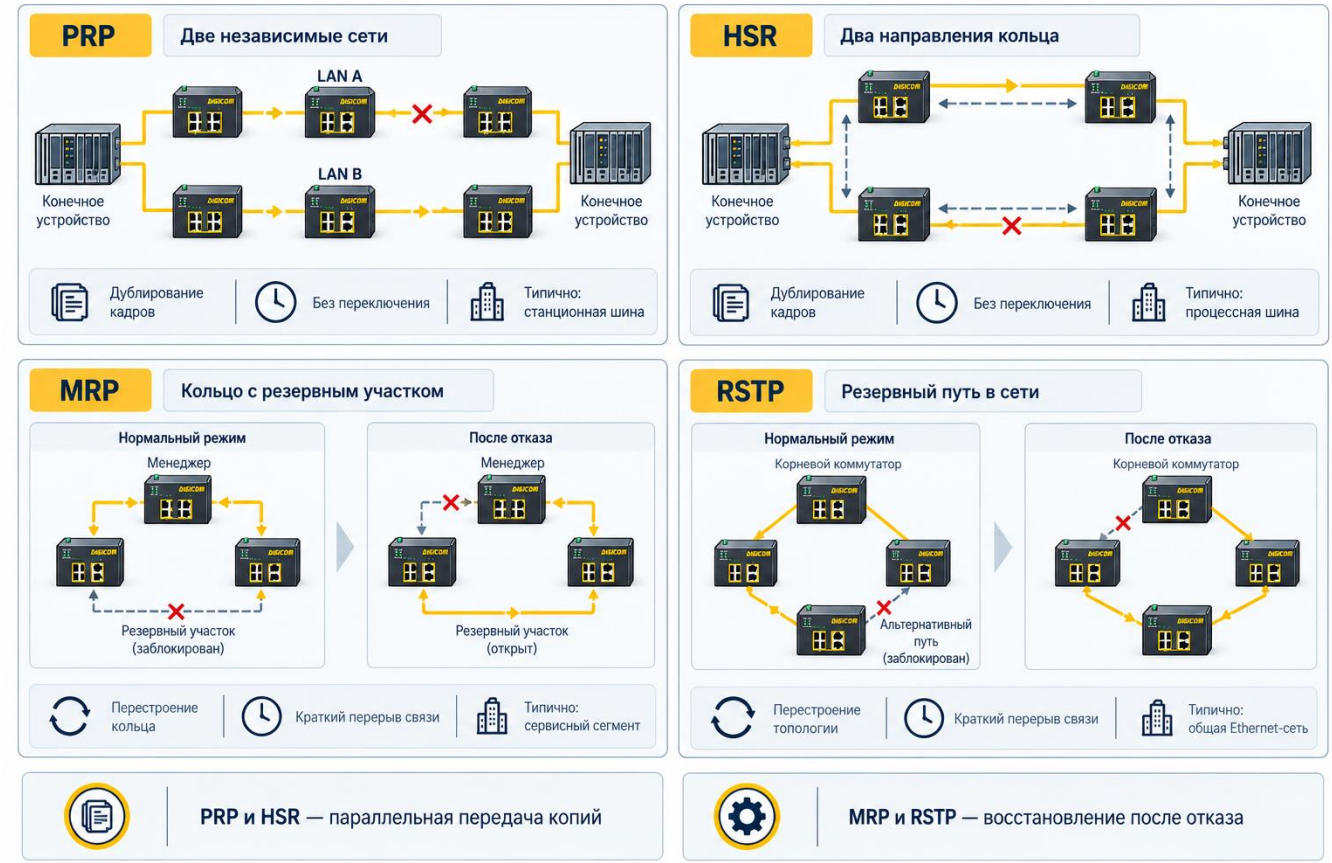
Для работы SyncE требуется сквозная поддержка на соответствующем сетевом участке: совместимые физические интерфейсы, сетевые часы и механизм выбора качественного источника частоты. Установка одного коммутатора с SyncE в обычную асинхронную сеть не создаёт синхронный тракт.

Поддержка SyncE нужна не на каждом объекте. Во многих подстанционных сетях требуемая точность достигается средствами PTP при правильной архитектуре и аппаратной поддержке времени. SyncE применяется там, где предъявляются повышенные требования к стабильности частоты, резервированию источников синхронизации и поведению системы при временной потере опорного сигнала.

5. Резервирование сети: PRP, HSR, MRP и RSTP

Надёжность подстанционной сети зависит от способности сохранять связь при обрыве кабеля, отказе порта, коммутатора или источника питания. Для этого применяются механизмы резервирования с разными принципами действия.

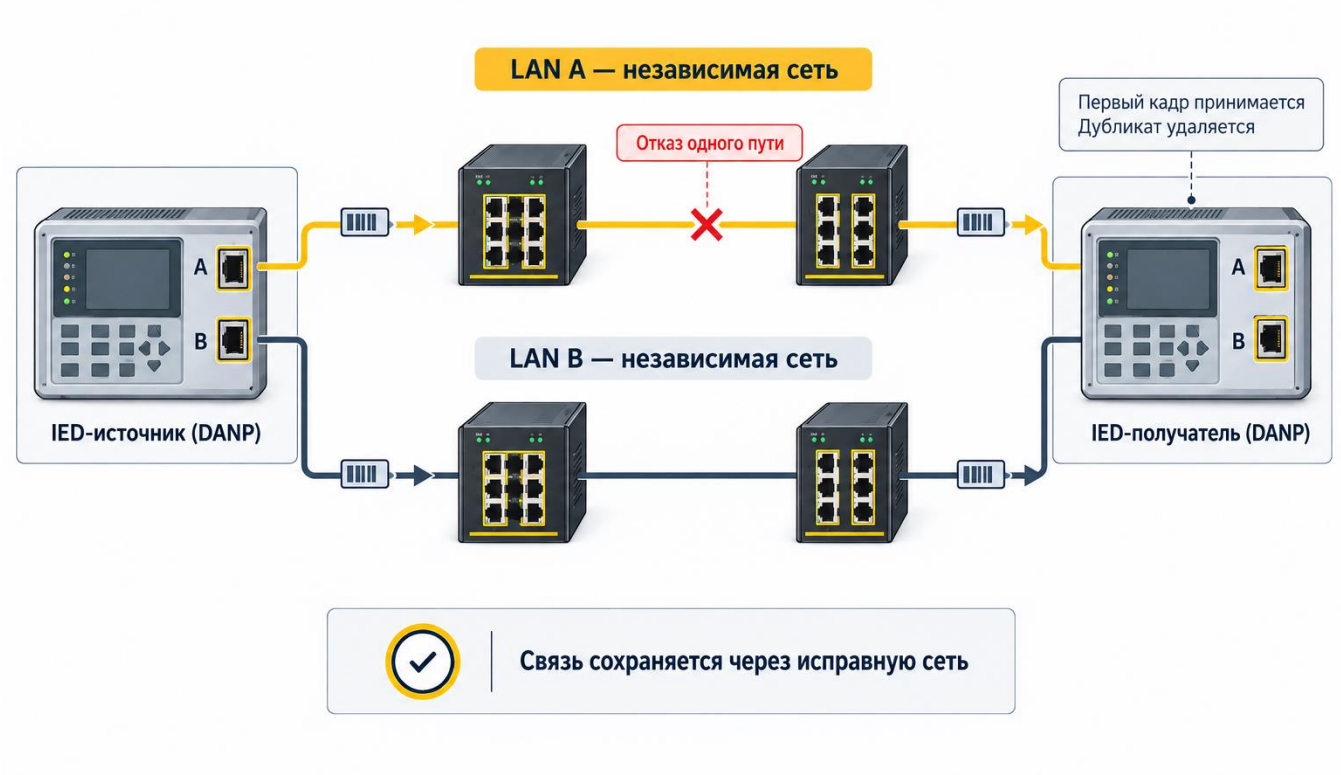
Протоколы PRP и HSR передают дублированные кадры по двум направлениям одновременно. Переключение маршрута после аварии им не требуется. MRP и RSTP работают иначе: в нормальном режиме один из избыточных путей заблокирован, а после повреждения сеть изменяет активную топологию. На перестроение требуется некоторое время, в течение которого возможна потеря части трафика.



5.1. PRP: две параллельные независимые сети

Протокол параллельного резервирования (Parallel Redundancy Protocol, PRP) строится на двух отдельных Ethernet-сетях, которые принято обозначать LAN A и LAN B. Критичное устройство подключается к обеим сетям и одновременно отправляет в них два экземпляра каждого кадра.

Получатель принимает первый пришедший кадр и передаёт его своему приложению. Второй экземпляр распознаётся по служебной информации и отбрасывается. При отказе одного пути копия, прошедшая через исправную сеть, продолжает поступать получателю. Согласно IEC 62439-3, PRP относится к протоколам бесшовного резервирования с нулевым временем восстановления при единичном отказе сетевого элемента.



Устройство с двумя PRP-интерфейсами называется узлом с двойным подключением к PRP (Double Attached Node implementing PRP, DANP). Оно формирует дубликаты и удаляет повторные кадры без участия промежуточных коммутаторов.

Внутри LAN A и LAN B могут использоваться обычные управляемые Ethernet-коммутаторы. Поддержка PRP требуется конечным устройствам либо внешним блокам резервирования. Такое построение упрощает выбор сетевого оборудования, но требует двух полноценных инфраструктур: отдельных портов, линий связи, коммутаторов и, по возможности, независимых источников питания.

Физическая независимость LAN A и LAN B имеет принципиальное значение. Если обе линии проложены в одном кабельном лотке, два коммутатора питаются от одного автомата или обе сети сходятся в общем промежуточном устройстве, сохраняется общий источник отказа. Формальное наличие двух подключений в таком случае не даёт требуемой отказоустойчивости.

PRP увеличивает суммарный объём передаваемых данных, поскольку один и тот же кадр присутствует в обеих сетях. При этом внутри каждой LAN передаётся только одна копия. Пропускную способность обеих сетей рассчитывают для полного рабочего трафика: каждая из них должна самостоятельно принять всю нагрузку.

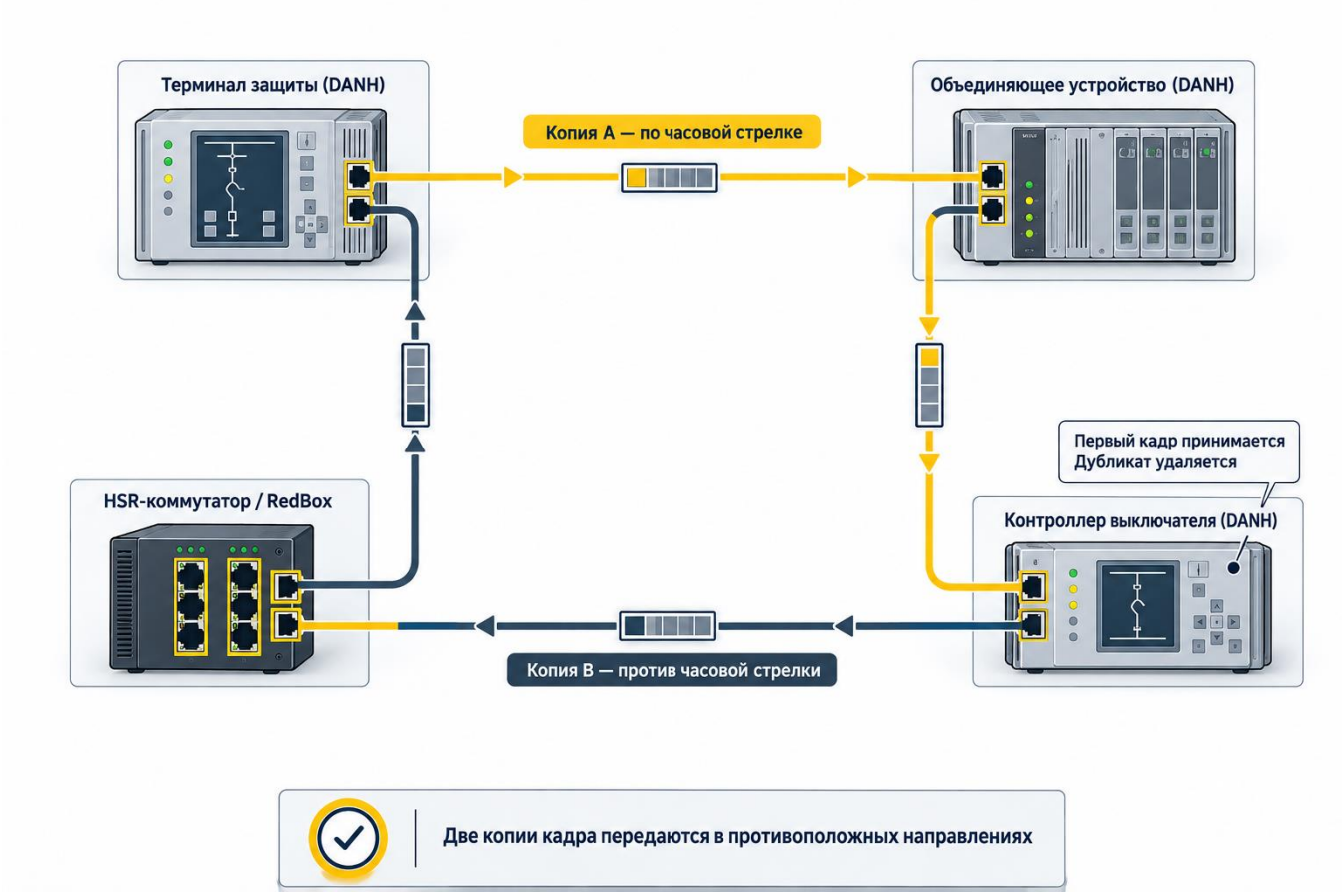
К преимуществам PRP относятся бесшовная работа при единичном отказе и возможность применения стандартных коммутаторов. Основные издержки связаны с удвоением сетевой инфраструктуры, количества портов и оптических линий.

5.2. HSR: резервирование внутри кольца

Бесшовное резервирование с высокой готовностью (High-availability Seamless Redundancy, HSR) также использует дублирование кадров, но работает в кольцевой топологии. Каждый HSR-узел имеет два кольцевых порта и соединяется с двумя соседними устройствами.

Исходный кадр передаётся в обоих направлениях кольца. Получатель обрабатывает первую поступившую копию и отбрасывает вторую. При обрыве одного участка один экземпляр кадра проходит по оставшемуся

пути. Перестроение логической топологии не требуется, поэтому HSR, как и PRP, имеет нулевое время восстановления при единичном отказе в пределах предусмотренной стандартом модели. Оба протокола определены IEC 62439-3.



Узел с двумя HSR-портами называется узлом с двойным подключением к HSR (Double Attached Node implementing HSR, DANH). Он принимает, передаёт и пересылает кадры других участников кольца. По этой причине HSR требует поддержки протокола всеми устройствами, непосредственно включёнными в кольцо.

Через каждый промежуточный узел проходит транзитный трафик. При увеличении кольца растут суммарная нагрузка и количество переходов между устройствами. Для GOOSE и Sampled Values это требует проверки производительности, задержки и размеров очередей. Особенно тщательно оцениваются кольца с большим количеством потоков выборочных значений.

При единичном обрыве кольцо превращается в линейную структуру, а связь между оставшимися узлами сохраняется. Два повреждения в разных точках могут разделить сеть на изолированные участки. Поэтому HSR не отменяет требования к качеству монтажа, раздельной прокладке противоположных участков кольца и контролю состояния обоих направлений.

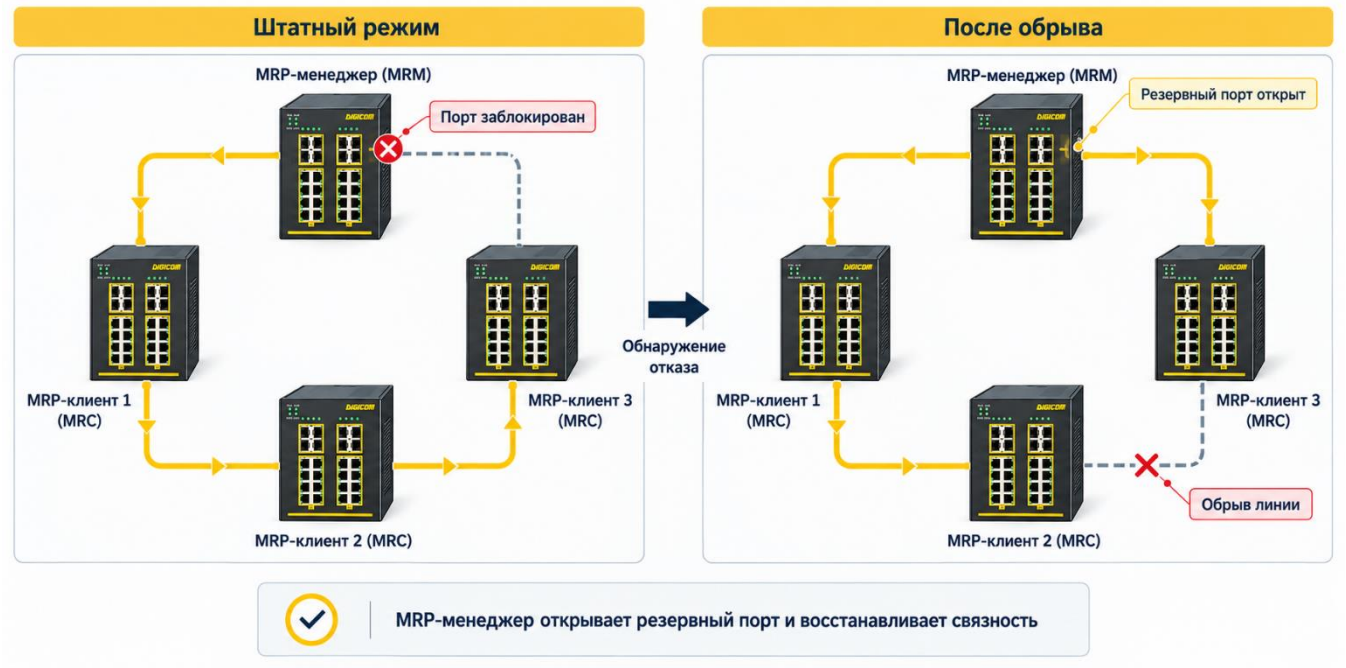
HSR удобно применять в процессной сети отдельного присоединения, где количество узлов ограничено, а потеря даже нескольких последовательных кадров нежелательна. Для крупных станционных сетей PRP обычно даёт более свободную топологию и лучше масштабируется, хотя требует двух комплектов сетевой инфраструктуры.

5.3. MRP: восстановление промышленного кольца

Протокол резервирования среды передачи (Media Redundancy Protocol, MRP) определён IEC 62439-2 и рассчитан на кольцевую топологию. Один из коммутаторов выполняет роль менеджера резервирования среды (Media Redundancy Manager, MRM), остальные работают как клиенты резервирования среды (Media Redundancy Client, MRC).

В штатном режиме менеджер блокирует передачу пользовательского трафика через один из своих кольцевых портов. Физическое кольцо логически превращается в линию, поэтому кадры не циркулируют по замкнутому контуру. Менеджер контролирует целостность кольца с помощью служебных сообщений.

После обнаружения разрыва ранее заблокированный порт переводится в рабочее состояние. Коммутаторы обновляют таблицы MAC-адресов, и трафик начинает проходить в обход повреждённого участка.



IEC 62439-2 рассматривает MRP как детерминированный протокол восстановления после единичного отказа межкоммутаторной линии или коммутатора под управлением выделенного менеджера. Стандарт предусматривает классы максимального времени восстановления, включая 500, 200, 30 и 10 мс. Достижимый класс зависит от количества устройств в кольце, настроек, производительности коммутаторов и результатов испытаний конкретной реализации.

Во время перестроения часть кадров может быть потеряна. Для служебной сети или некритичных систем перерыв в несколько десятков либо сотен миллисекунд часто допустим. Для команд релейной защиты такая пауза может оказаться неприемлемой. В подобных цепях предпочтение обычно отдаётся PRP или HSR.

MRP экономичнее PRP по количеству линий и портов. Резервная связь присутствует в том же кольце, а передача пользовательского трафика идёт по одному активному пути. Недостатком остаётся зависимость от процедуры обнаружения отказа и перестроения сети.

5.4. RSTP: резервирование произвольной Ethernet-топологии

Протокол быстрого связующего дерева (Rapid Spanning Tree Protocol, RSTP) применяется в сетях с несколькими возможными путями между коммутаторами. Его функции входят в семейство стандартов IEEE 802.1Q.

Коммутаторы обмениваются служебными блоками данных моста (Bridge Protocol Data Unit, BPDU), выбирают корневой коммутатор и рассчитывают активные пути до него. Избыточные порты переводятся в состояние, при котором пользовательский трафик через них не проходит. После отказа основного соединения один из альтернативных портов может перейти в рабочее состояние.

RSTP подходит для разветвлённых и смешанных топологий, где невозможно или нецелесообразно строить одно MRP-кольцо. Он широко поддерживается сетевым оборудованием разных производителей и удобен для сервисных сегментов, систем видеонаблюдения, инженерного доступа и других приложений с умеренными требованиями ко времени восстановления.

Время перестроения RSTP зависит от топологии, настроек портов, количества коммутаторов и характера повреждения. Для корректно спроектированной сети оно значительно меньше, чем у классического протокола связующего дерева STP, но обычно менее предсказуемо, чем у MRP. Потеря кадров во время изменения активной топологии остаётся возможной.

Особое внимание требуется выбору корневого коммутатора, стоимости путей, защите BPDU, настройке граничных портов и ограничению диаметра сети. Автоматический выбор без проектного назначения приоритетов может сформировать нежелательные маршруты и направить трафик через менее производительные соединения.

5.5. Сравнение протоколов резервирования

Критерий	PRP	HSR	MRP	RSTP
Нормативная основа	IEC 62439-3	IEC 62439-3	IEC 62439-2	IEEE 802.1Q
Основная топология	Две независимые Ethernet-сети	Кольцо HSR	Промышленное кольцо	Произвольная связная топология
Принцип работы	Две копии кадра передаются по разным сетям	Две копии идут в противоположных направлениях	Один путь активен, резервный открывается после отказа	Избыточные пути блокируются, после отказа дерево перестраивается
Время восстановления при единичном отказе	Нулевое	Нулевое	Определяется классом MRP	Зависит от топологии и настроек
Потеря кадров при переключении	Для предусмотренного единичного отказа переключение отсутствует	Для предусмотренного единичного отказа переключение отсутствует	Возможна	Возможна

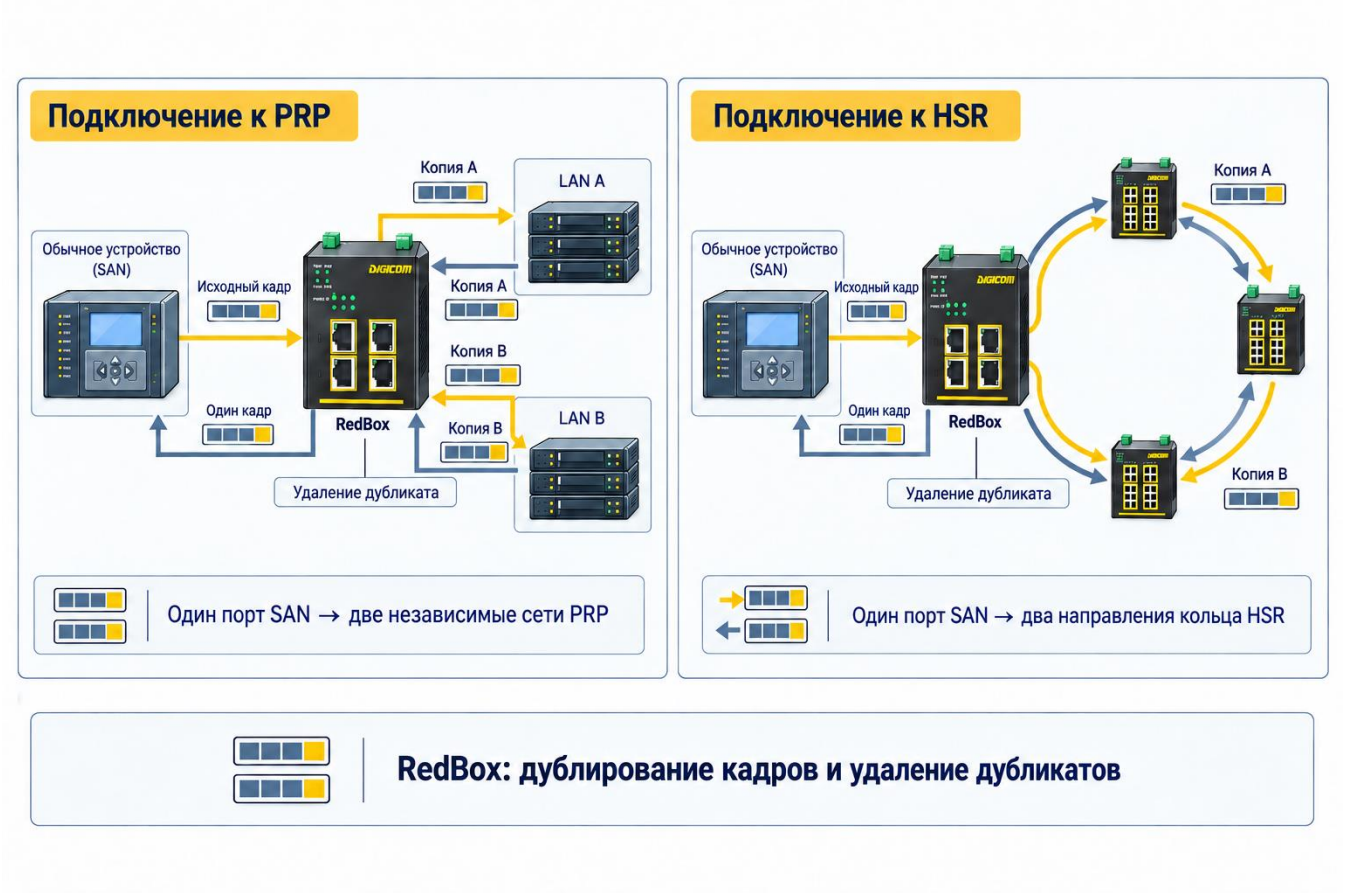
Критерий	PRP	HSR	MRP	RSTP
Требования к конечным устройствам	PRP или подключение через RedBox	HSR или подключение через RedBox	Поддержка от конечных устройств обычно не требуется	Поддержка от конечных устройств не требуется
Требования к коммутаторам	Внутри LAN A и LAN B допустимы обычные управляемые коммутаторы	Узлы кольца должны поддерживать HSR	Все участники кольца должны поддерживать совместимую реализацию MRP	Коммутаторы должны поддерживать RSTP
Расход полосы	Полный трафик передаётся в каждой из двух сетей	Дублированный трафик проходит по кольцу	Один активный экземпляр кадра	Один активный экземпляр кадра
Масштабирование	Хорошее, при наличии двух сетей	Ограничивается нагрузкой и числом переходов	Ограничивается параметрами кольца	Подходит для разветвлённых сетей
Типичное применение	Станционная шина, ответственные серверы и терминалы	Процессная шина, сеть отдельного присоединения	Сервисные и технологические кольца	Сервисные и смешанные сегменты
Основной риск	Общая точка отказа между LAN A и LAN B	Двойной разрыв кольца, высокая транзитная нагрузка	Перерыв во время восстановления	Непредсказуемый маршрут или увеличенное время сходимости при ошибочной настройке

PRP и HSR выбирают для потоков, где перерыв на перестроение сети недопустим. MRP целесообразен для компактного промышленного кольца с известным временем восстановления. RSTP удобен для более свободной топологии и совместимости оборудования, если приложение допускает паузу при изменении маршрута.

6. RedBox и взаимодействие с коммутаторами

6.1. Назначение RedBox

Блок резервирования (Redundancy Box, RedBox) подключает устройства без встроенной поддержки PRP или HSR к сети бесшовного резервирования. Обычное устройство с одним Ethernet-интерфейсом называется узлом с одиночным подключением (Single Attached Node, SAN).



Со стороны SAN блок работает как стандартное Ethernet-подключение. Со стороны резервированной сети он выполняет функции PRP- или HSR-узла: создаёт копии исходящих кадров, добавляет необходимую служебную информацию, принимает кадры с резервных путей и удаляет дубликаты.

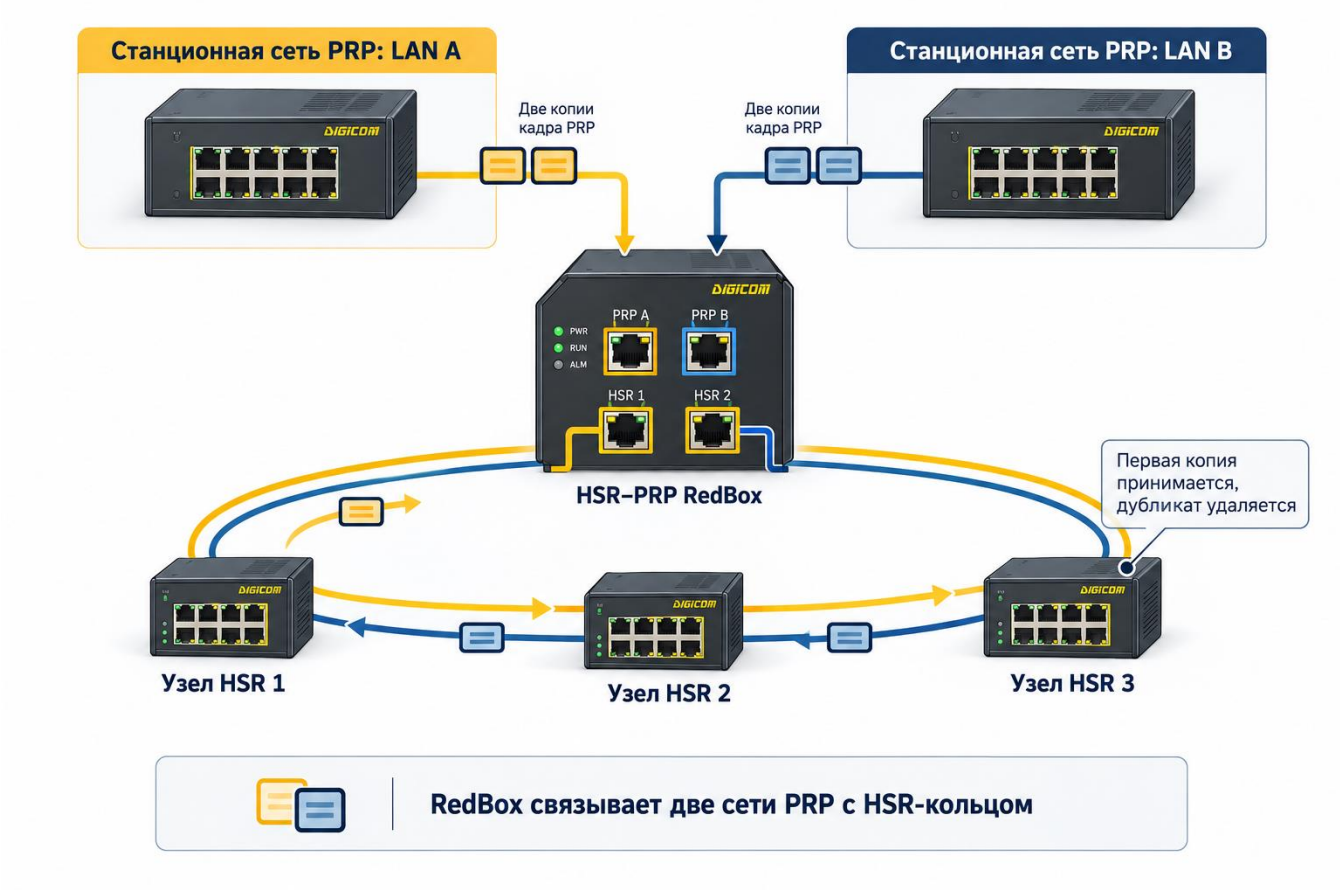
Для PRP входящий от SAN кадр передаётся в LAN A и LAN B. В обратном направлении RedBox принимает две копии, выбирает первую и передаёт устройству один обычный Ethernet-кадр. Подключённое устройство не участвует в работе PRP и не видит процесса удаления дубликатов.

В HSR блок формирует два кадра и направляет их в противоположные стороны кольца. Полученные копии сопоставляются по служебным признакам, после чего в обычный Ethernet-сегмент передаётся один экземпляр.

6.2. Варианты применения

RedBox применяется в нескольких вариантах:

1. **Подключение одиночного устройства к PRP.** Сервер, контроллер или терминал с одним сетевым интерфейсом получает доступ к двум параллельным сетям через внешний блок.
2. **Подключение обычного сегмента к HSR.** За RedBox может находиться одно устройство или небольшой Ethernet-сегмент с несколькими узлами.
3. **Связь PRP и HSR.** Комбинированный HSR–PRP RedBox передаёт данные между двумя PRP-сетями и HSR-кольцом, преобразуя способ резервирования.
4. **Соединение HSR-колец.** Для этой задачи применяется четырёхпортовое устройство, часто называемое **QuadBox**. Оно имеет по два кольцевых порта для каждой стороны соединения.
5. **Встроенная функция промышленного коммутатора.** Коммутатор может совмещать обычные Ethernet-порты, порты PRP или HSR и функции RedBox в одном корпусе.



Встроенный RedBox сокращает количество отдельных устройств, соединительных кабелей и источников питания. Одновременно в одном корпусе концентрируются функции коммутации и преобразования резервирования. Его отказ способен затронуть весь подключённый сегмент, поэтому роль такого узла необходимо учитывать при анализе отказов.

6.3. Требования к RedBox и коммутатору с функцией RedBox

Производительности RedBox должно хватать для суммарного трафика всех подключённых устройств. Для GOOSE и Sampled Values важны следующие характеристики:

- обработка PRP- или HSR-кадров на полной скорости портов;
- достаточная производительность механизма удаления дубликатов;
- низкая и стабильная задержка;
- поддержка VLAN и приоритетов IEEE 802.1p;
- корректная передача многоадресных кадров;
- счётчики дубликатов, потерянных последовательностей и состояния резервных путей;
- совместимость с используемой редакцией IEC 62439-3;
- поддержка требуемого профиля PTP либо предсказуемая передача сообщений синхронизации;
- резервированное питание и исполнение по условиям подстанции.

Следует учитывать максимальный размер кадра. PRP и HSR добавляют служебные поля, поэтому оборудование должно принимать увеличенные Ethernet-кадры без усечения или отбрасывания.

Диагностика RedBox имеет практическое значение. Система управления должна показывать состояние обоих PRP-подключений или направлений HSR-кольца, количество принятых дубликатов, потерю одного из путей и ошибки последовательности. Внешне обмен может продолжаться нормально даже после повреждения резервного направления. Без диагностики сеть останется в ослабленном состоянии до появления второго отказа.

6.4. RedBox как потенциальная точка отказа

Подключение нескольких критичных устройств через один RedBox объединяет их зависимость от его питания, аппаратной части и программного обеспечения. PRP или HSR защищает линии за RedBox, но отказ самого блока разрывает связь со всем присоединённым обычным сегментом.

Для ответственных устройств предпочтительна встроенная поддержка PRP или HSR. Если используются SAN-устройства, проект должен учитывать резервирование RedBox либо допустимые последствия его отказа. Конкретная схема зависит от возможностей оборудования: универсального способа параллельно подключить любой однопортовый узел через два независимых RedBox без дополнительной логики нет.

7. Типовая комплексная архитектура сети подстанции

7.1. Комплексная схема подстанции



На одной подстанции необязательно применять один механизм резервирования для всех сетей. Рациональнее разделить сеть на функциональные сегменты и выбрать технологию по допустимому перерыву связи:

- PRP — для критичной станционной шины;
- HSR — для компактных сегментов процессной шины;
- MRP — для технологических и сервисных колец;
- RSTP/MSTP — для общей инфраструктуры, административных и некритичных сегментов.

Это один из обоснованных вариантов построения сети. Конкретная архитектура зависит от функций защиты, количества присоединений, трафика SV, физической планировки и требований эксплуатирующей организации. Такая структура представляет собой пример инженерного решения. IEC 61850 не требует обязательного применения именно этой комбинации: процессная шина также может строиться на PRP, а станционная сеть — по другой резервированной схеме.

Станционная шина PRP переносит:

- MMS;
- станционный GOOSE;
- PTP;
- события;
- команды;
- данные между терминалами и SCADA.

Процессная шина HSR переносит:

- Sampled Values;
- быстрый GOOSE;
- PTP;
- состояние первичного оборудования.

Сервисная сеть MRP/RSTP переносит:

- SNMP;
- Syslog;
- резервные копии конфигураций;
- доступ к Web/CLI;
- обновления ПО;
- видеонаблюдение;
- некритичную диагностику.

Как соединять сегменты. Сегменты не следует объединять одним неуправляемым мостом. На границах применяются:

- маршрутизаторы;
- межсетевые экраны;
- Layer 3-коммутаторы;
- RedBox;
- специализированные шлюзы;
- IED с несколькими раздельными сетевыми интерфейсами.

Между PRP и обычной сетью используется RedBox либо маршрутизатор с интерфейсами в обеих средах.

Между PRP и HSR используется PRP–HSR RedBox или устройство с соответствующими независимыми интерфейсами.

Между технологической и сервисной сетью предпочтительна маршрутизация с ACL или межсетевым экраном. Прозрачное объединение расширяет область multicast и увеличивает последствия сетевой ошибки.

Между MRP и RSTP лучше завершать один домен резервирования на граничном коммутаторе и далее использовать другой механизм. Одновременная работа MRP и RSTP на одной физической петле может привести к конфликту управляющей логики.

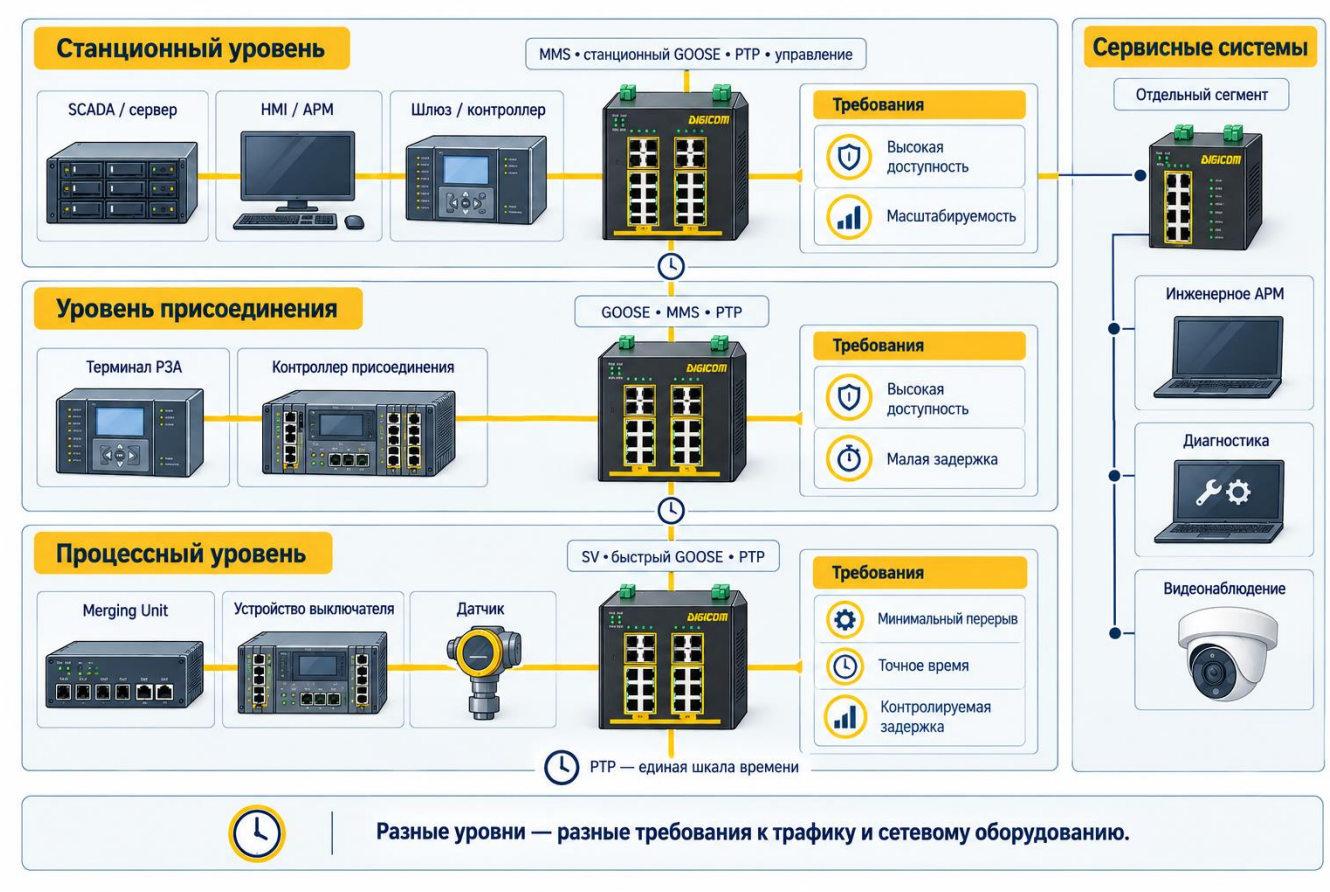
7.2. Функциональные уровни подстанционной сети

Упрощённо цифровую подстанцию можно разделить на три уровня.

Уровень	Оборудование	Основной трафик	Требования
Станционный	SCADA, HMI, серверы, шлюзы, АРМ, контроллеры	MMS, станционный GOOSE, PTP, управление	Высокая доступность, масштабируемость
Уровень присоединения	Терминалы РЗА, контроллеры присоединения	GOOSE, MMS, PTP	Высокая доступность и малая задержка
Процессный	Merging Unit, интеллектуальные устройства выключателя, датчики	SV, быстрый GOOSE, PTP	Минимальный перерыв, точное время, контролируемая задержка

Сервисные системы обычно выделяются отдельно:

- управление коммутаторами;
- диагностика;
- видеонаблюдение;
- контроль доступа;
- инженерные рабочие места;
- загрузка конфигураций;
- сбор журналов;
- мониторинг состояния оборудования.



7.3. Станционная шина на основе PRP

Строятся две независимые Ethernet-сети — LAN A и LAN B. Серверы подстанции, шлюзы, устройства синхронизации и терминалы присоединений подключаются к обеим сетям как DANP либо через RedBox.

Коммутаторы LAN A и LAN B могут не обрабатывать PRP на уровне протокола. Для них PRP-кадры представляют собой обычный Ethernet-трафик. При этом оборудование должно соответствовать требованиям подстанционной эксплуатации и поддерживать необходимые функции VLAN, QoS, PTP, мониторинга и обработки многоадресных потоков.

Обе сети должны иметь согласованные настройки VLAN и приоритетов. Расхождение конфигураций приводит к ситуации, при которой один путь передаёт трафик правильно, а второй блокирует отдельные потоки. До первого отказа такая ошибка может оставаться незаметной.

Независимость PRP предусматривает раздельные:

- коммутаторы;
- линии связи и кабельные трассы;
- вводы питания;
- оптические кроссы, если это возможно;
- порты серверов и терминалов;
- цепочки промежуточного оборудования.

Прямые соединения между LAN A и LAN B нарушают принцип разделения. Связь между ними выполняется только устройствами и способами, предусмотренными архитектурой PRP.

7.4. Процессная шина на основе HSR

На процессном уровне HSR-кольцо может объединять терминалы защиты, объединяющие устройства, контроллеры выключателей и другие устройства одного присоединения. Каждое из них передаёт данные в двух направлениях.

Такой подход сокращает количество центральных коммутаторов и оптических линий по сравнению с двумя отдельными PRP-сетями. Одновременно каждый участник кольца становится транзитным узлом, поэтому его производительность и задержка влияют на весь сегмент.

Для крупных подстанций процессную сеть обычно делят на несколько колец по присоединениям, секциям или группам функций. Это ограничивает объём транзитного трафика и область распространения неисправности. Объединение слишком большого числа потоков SV в одном кольце повышает загрузку линий и увеличивает задержку прохождения через последовательность узлов.

Связь HSR-кольца со станционной сетью PRP выполняется через HSR–PRP RedBox. Он принимает кадры из обоих PRP-сегментов и передаёт их по двум направлениям HSR. В обратном направлении блок удаляет дубликаты и формирует кадры для LAN A и LAN B.

Если RedBox обслуживает целое присоединение, его отказ затрагивает обмен между этим присоединением и станционной шиной. При выборе архитектуры оцениваются последствия такого отказа, необходимость резервирования RedBox и способность защит работать автономно при потере связи с верхним уровнем.

7.5. Сервисные сегменты на основе MRP или RSTP

Сервисная сеть используется для инженерного доступа, загрузки конфигураций, сбора диагностической информации, подключения систем видеонаблюдения и обслуживания вспомогательного оборудования. Для этих задач кратковременный перерыв связи обычно менее критичен, чем для GOOSE или SV.

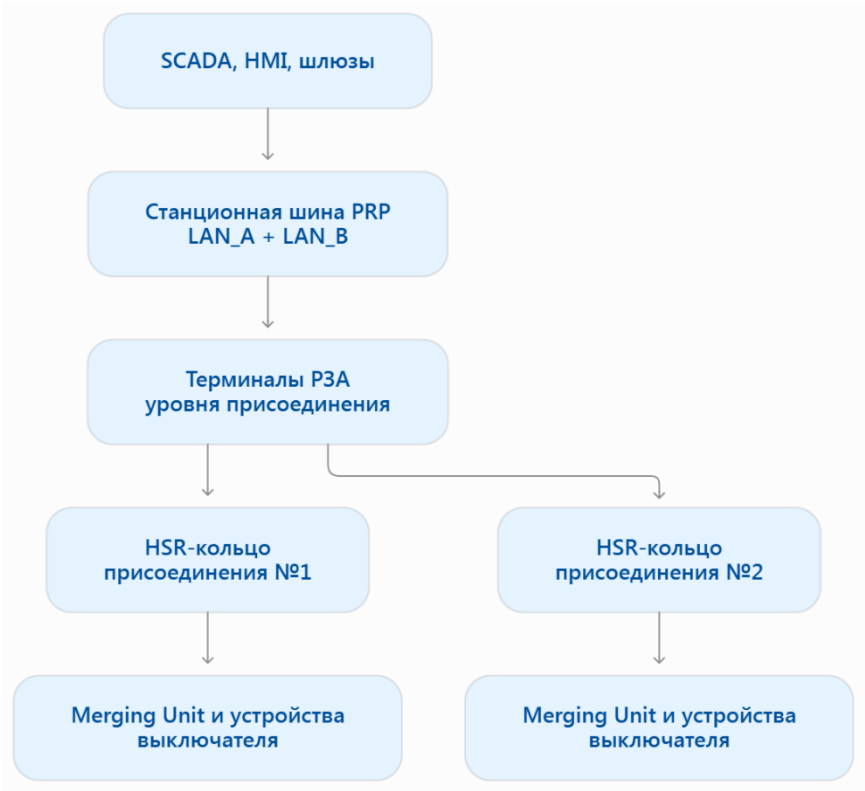
MRP целесообразен при последовательном размещении оборудования вдоль объекта и возможности построить одно контролируемое кольцо. Он даёт заранее определяемый сценарий восстановления и удобен для промышленной топологии с известным количеством коммутаторов.

RSTP подходит для сети с ответвлениями, несколькими уровнями агрегации и оборудованием разных производителей. При его применении требуется заранее назначить корневой коммутатор, проверить резервные пути и ограничить распространение изменений топологии.

Сервисная сеть не должна использоваться как случайный транзитный путь для критического трафика процессной шины. Соединение со станционной сетью выполняется через управляемую точку — маршрутизатор, межсетевой экран или коммутатор третьего уровня. В этой точке задаются разрешённые направления обмена, правила доступа и границы широковещательных доменов.

7.6. Схема 1. PRP на станционной шине и отдельные HSR-кольца присоединений

Это один из наиболее логичных вариантов для цифровой подстанции.



Станционная шина PRP

Станционная шина состоит из двух независимых сетей:

```
LAN A: Коммутатор A1 — Коммутатор A2 — Коммутатор A3
LAN B: Коммутатор B1 — Коммутатор B2 — Коммутатор B3
```

К обеим сетям подключаются:

- SCADA-серверы;
- станционные контроллеры;
- шлюзы телемеханики;
- терминалы РЗА;
- серверы архивов;
- устройства синхронизации;
- сетевые системы диагностики.

Устройства с двумя PRP-интерфейсами работают как DANP. Оборудование с одним интерфейсом подключается через RedBox.

По станционной шине передаются:

- MMS;
- станционный GOOSE;
- отчёты и события;

- команды управления;
- PTP;
- инженерный трафик в выделенных VLAN.

Процессная шина HSR

Для каждого присоединения или группы присоединений создаётся отдельное HSR-кольцо.

В кольцо могут входить:

- терминал защиты;
- Merging Unit;
- контроллер выключателя;
- интеллектуальный модуль дискретных входов и выходов;
- другое процессное IED.

По HSR-кольцу передаются:

- Sampled Values;
- GOOSE-команды отключения;
- положение выключателя;
- сигналы блокировок;
- PTP.

При одном разрыве кольца кадры продолжают поступать по противоположному направлению. IEC 62439-3 определяет HSR как протокол параллельной передачи дублированной информации в кольцевой или поддерживаемой многопортовой топологии.

Связь PRP и HSR

Связь может выполняться двумя способами.

Через многопортовый терминал РЗА. Терминал имеет:

- PRP-интерфейсы для станционной шины;
- HSR-интерфейсы для процессной шины;
- раздельные сетевые функции внутри устройства.

В этом случае терминал участвует в обеих сетях, но не обязательно работает как прозрачный мост между ними. Передача данных между уровнями выполняется его прикладной логикой.

Через PRP–HSR RedBox. Специализированный RedBox соединяет PRP-сеть и HSR-кольцо:

```
PRP LAN_A ─┐
           ├─ PRP–HSR RedBox — HSR-кольцо
PRP LAN_B ─┘
```

В такой конфигурации RedBox должен:

- обрабатывать PRP-дубликаты;
- формировать HSR-копии;

- выполнять обратное преобразование;
- исключать бесконечную циркуляцию кадров;
- сохранять VLAN и PCP;
- корректно обрабатывать GOOSE, SV и PTP;
- поддерживать требуемую пропускную способность.

Для резервированного сопряжения могут потребоваться два RedBox и специальная схема соединения. Один RedBox остаётся общей точкой отказа.

Почему HSR-кольца желательно разделять по присоединениям

Одно большое HSR-кольцо для всей подстанции выглядит экономно, но имеет недостатки:

- каждый узел передаёт транзитные кадры;
- все SV-потоки используют общую полосу;
- увеличивается задержка;
- растёт таблица удаления дубликатов;
- обслуживание одного участка затрагивает большую часть сети;
- два разрыва способны разделить крупный сегмент;
- поиск неисправности становится сложнее.

Разделение на небольшие кольца даёт:

- ограниченный объём SV-трафика;
- локализацию отказа;
- меньшее число транзитных узлов;
- более простой расчёт задержки;
- независимое обслуживание присоединений;
- более понятную диагностику.

Размер кольца следует определять расчётом, а не только максимально допустимым числом узлов.

7.7. Схема 2. PRP как общая магистраль и HSR как локальные ответвления

При большом числе присоединений можно использовать PRP как резервированную магистраль, а HSR — локально внутри ячеек.



Преимущества:

- единая резервированная магистраль;
- локализация процессного трафика;
- возможность подключать обычные и HSR-устройства;
- физическое разделение присоединений;
- независимое расширение отдельных сегментов.

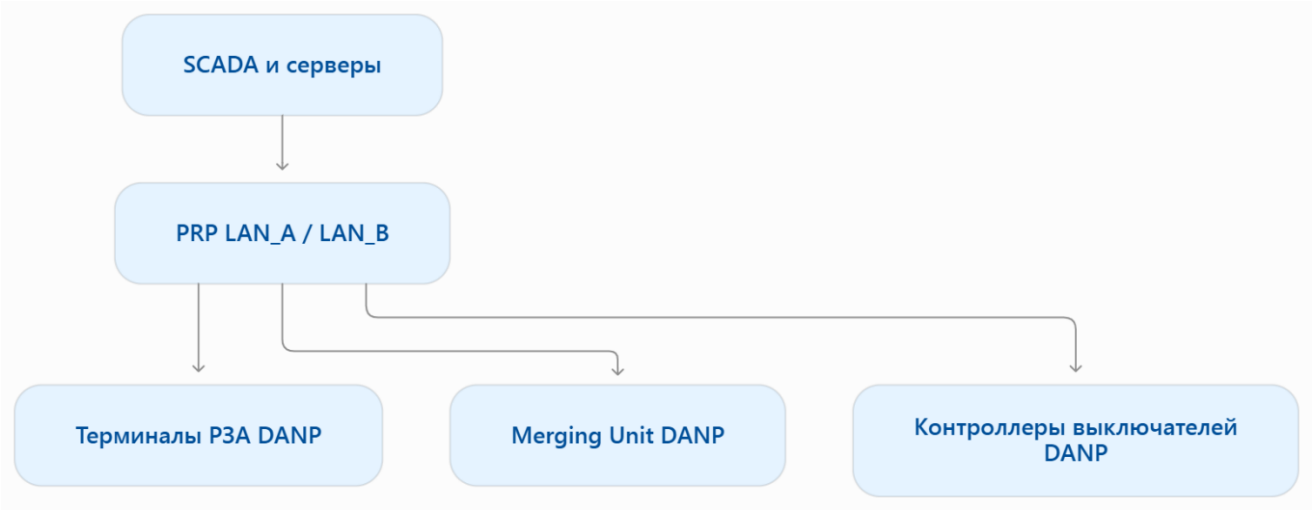
Главная опасность — передача всех SV-потоков в общую PRP-магистраль без необходимости. Это увеличивает нагрузку сразу на две сети.

Практический подход:

- локальные SV остаются внутри HSR-кольца присоединения;
- в PRP передаются только данные, требуемые станционным устройствам;
- межсекционные или шинные защиты получают нужные потоки по заранее рассчитанным маршрутам;
- multicast-фильтрация ограничивает распространение SV и GOOSE.

7.8. Схема 3. Полностью PRP-резервированная подстанция

Вместо HSR процессная и станционная шины могут использовать PRP:



В этом случае все критичные устройства подключены к двум сетям.

Преимущества:

- единый принцип резервирования;
- обычная коммутируемая топология;
- отсутствие транзита кадров через конечные IED;
- проще масштабировать, чем большое HSR-кольцо;
- повреждение одного IED не разрывает физический путь других устройств.

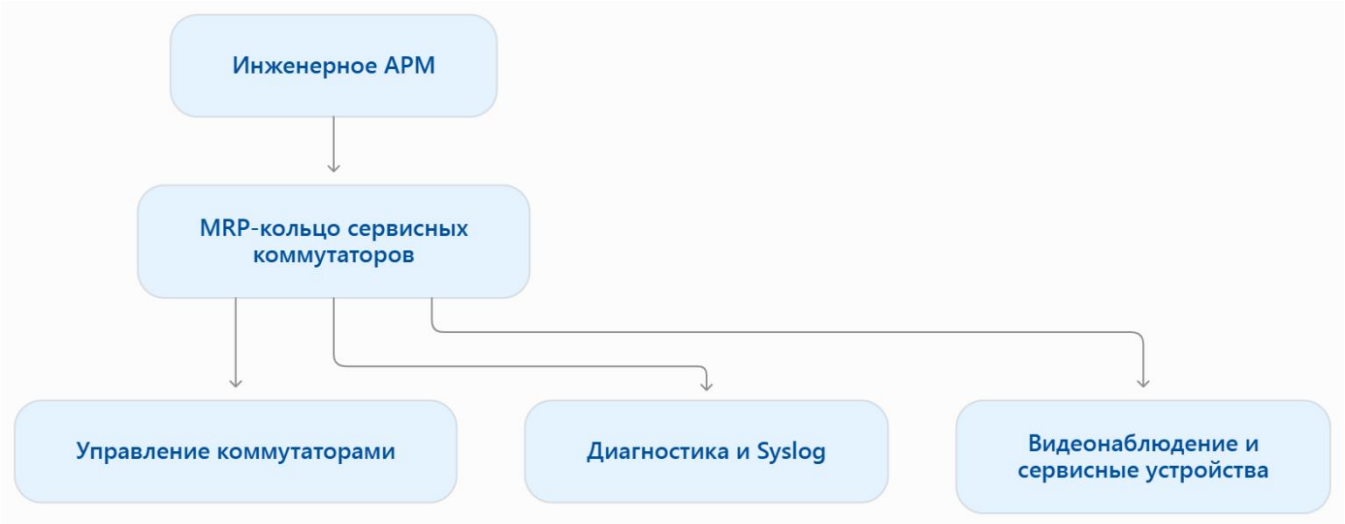
Недостатки:

- две полные сети;
- двойное число сетевых портов и линий;
- высокая стоимость;
- большой объём дублированного SV-трафика;
- необходимость физических разнесённых трасс;
- больше коммутаторов, шкафов и источников питания.

Такой вариант технически обоснованнее для крупной процессной шины, если стоимость двух инфраструктур приемлема.

7.9. Схема 4. MRP для сервисной сети

Сервисная сеть может быть построена как MRP-кольцо.



В нормальном состоянии MRP Manager блокирует один участок кольца для пользовательского трафика. После обнаружения разрыва он активирует резервный путь.

IEC 62439-2 определяет MRP как детерминированный протокол восстановления кольцевой сети под управлением Media Redundancy Manager.

Для сервисной сети перерыв 200 или 500 мс обычно менее критичен, чем для процессной шины. Конкретная допустимость определяется функциями:

Сервис	Обычно допустим краткий перерыв
SNMP	Да
Syslog	Да, при наличии буферизации
Web/SSH-управление	Да
Загрузка конфигурации	Обычно TCP восстановит передачу
Видеонаблюдение	Возможна кратковременная потеря кадров
Инженерное АРМ	Обычно допустимо
Быстрое отключение защиты	Нет, сервисная сеть не должна быть единственным путём

7.10. Схема 5. RSTP/MSTP для административной и общей инфраструктуры

RSTP целесообразен в сегментах со сложной топологией, где кольцо MRP неудобно:



Здесь могут находиться:

- офисные рабочие места;
- системы документооборота;
- некритичная телефония;
- доступ к архивам;
- видеонаблюдение;
- сервисные серверы;
- связь с корпоративной сетью.

RSTP подходит для нескольких резервных связей и разветвлённой топологии, но его время восстановления зависит от структуры сети и характера отказа.

Если используются многочисленные VLAN с разными желательными путями, вместо RSTP целесообразно рассмотреть MSTP. Оно позволяет распределять группы VLAN между несколькими экземплярами связующего дерева.

7.11. Синхронизация в комплексной сети

Ведущие часы PTP подключаются к резервированной инфраструктуре с учётом общей модели отказов. В PRP-сети сигнал времени может передаваться через LAN A и LAN B. На границе с HSR требуется совместимое устройство, корректно обрабатывающее сообщения энергетического профиля PTP.

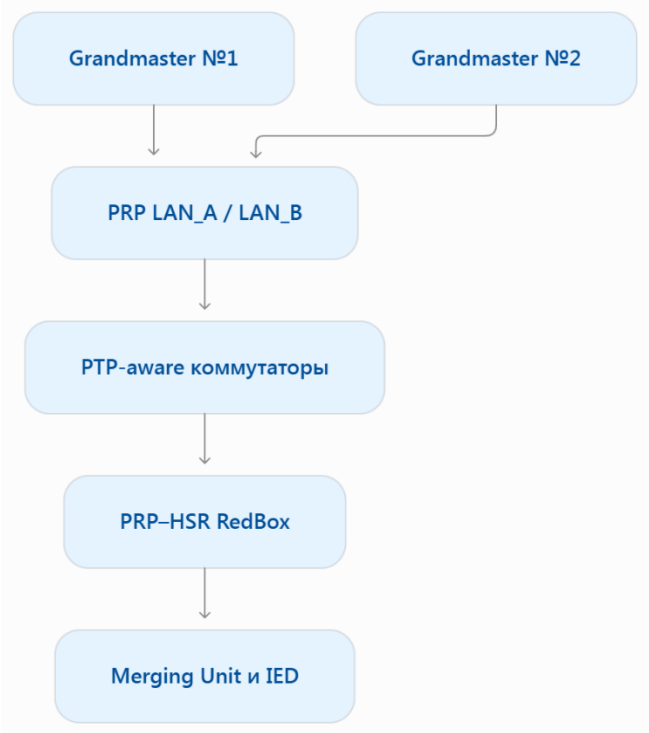
Коммутаторы, работающие как прозрачные или граничные часы, должны поддерживать один профиль и согласованную временную область. Переход через RedBox не должен создавать неизвестную или непредсказуемую асимметрию. При наличии нескольких источников времени проверяются порядок их

выбора, время перехода на резервный источник и поведение устройств после восстановления основного сигнала.

SyncE, если он предусмотрен проектом, требует непрерывного совместимого тракта через все участвующие интерфейсы. Наличие SyncE на станционном коммутаторе не передаёт частотную синхронизацию через HSR-кольцо, если RedBox и узлы кольца не поддерживают соответствующий режим.

Система точного времени

Один из возможных вариантов:



Для такой системы необходимо проверить:

- IEC/IEEE 61850-9-3;
- аппаратные временные метки;
- режимы Transparent Clock или Boundary Clock;
- P2P delay measurement;
- работу PTP через PRP/HSR;
- выбор основного и резервного Grandmaster;
- поведение при потере GNSS;
- изменение пути после восстановления MRP/RSTP;
- суммарную временную ошибку.

Резервирование сети не заменяет резервирование источников времени. Две PRP-сети, подключённые к одному Grandmaster и одному GNSS-приёмнику, имеют общую точку отказа.

7.12. Сравнение уровней комплексной сети

Уровень сети	Основной трафик	Типовая технология резервирования	Допустимый перерыв	Основная роль коммутатора	Критические риски
Станционная шина	MMS, GOOSE, управление, отчёты, PTP	PRP	Для защищённых потоков переключение отсутствует	VLAN, QoS, multicast, PTP, диагностика, работа в двух независимых сетях	Общие точки отказа LAN A и LAN B, различия конфигураций
Процессная шина	GOOSE, Sampled Values, PTP	HSR или PRP	Потеря кадров крайне нежелательна	Минимальная задержка, высокая производительность, обработка резервированных кадров	Перегрузка кольца, двойной разрыв, отказ RedBox
Сервисная сеть	Настройка, диагностика, видео, служебные данные	MRP или RSTP	Кратковременный перерыв обычно допустим	Управление топологией, сегментация, контроль доступа	Ошибочная настройка кольца или корневого коммутатора
Межсетевое соединение	Разрешённый обмен между уровнями	Резервирование зависит от проекта	Определяется функцией	Фильтрация, маршрутизация, преобразование резервирования	Единичный шлюз, неконтролируемое объединение доменов
Система синхронизации	PTP, при необходимости SyncE	Резервные часы и пути передачи	Зависит от класса синхронизации	Аппаратные временные метки, прозрачные или граничные часы	Асимметрия путей, несовместимые профили, потеря источника времени

7.13. Анализ отказов комплексной схемы

При проектировании рассматривается не только обрыв отдельного кабеля. Проверяются последствия следующих событий:

- отказ одного коммутатора в LAN A или LAN B;
- потеря питания целой группы оборудования;
- повреждение общей кабельной трассы;
- разрыв одного и двух участков HSR-кольца;
- отказ RedBox между станционной и процессной шинами;

- потеря MRP-менеджера;
- смена корневого коммутатора RSTP;
- отказ основных ведущих часов PTP;
- перегрузка сети при массовой передаче GOOSE;
- ошибочная конфигурация VLAN или приоритетов только в одном резервном пути.

Результаты такого анализа определяют места установки резервных коммутаторов, RedBox, источников питания и ведущих часов. Они также показывают границы применимости каждого протокола: PRP и HSR защищают передачу данных от предусмотренных сетевых отказов, но не компенсируют ошибку конфигурации, отказ самого конечного устройства или повреждение общей инфраструктуры.

Поведение при типичных отказах

Отказ коммутатора PRP LAN_A

- LAN_A частично или полностью теряется;
- DANP и RedBox продолжают принимать копии через LAN_B;
- MMS-соединения обычно сохраняются;
- GOOSE и SV продолжают поступать по второму пути;
- система диагностики должна выдать предупреждение о деградации.

Технологическая связь остаётся, но резерв уже исчерпан.

Разрыв HSR-кольца

- одна копия перестаёт доходить;
- другая движется по сохранившемуся направлению;
- кольцо фактически становится линией;
- все исправные узлы могут продолжать обмен;
- второй разрыв способен разделить сеть.

Разрыв MRP-кольца

- MRM обнаруживает неисправность;
- ранее заблокированный путь активируется;
- в течение перестроения часть кадров может быть потеряна;
- после восстановления сеть работает по линейной схеме.

Отказ RSTP-связи

- коммутаторы пересчитывают дерево;
- резервный порт переходит в forwarding;
- возможен перерыв от долей секунды до нескольких секунд;
- TCP-приложения обычно восстанавливают потерянные данные;
- критичные GOOSE и SV не следует рассчитывать только на RSTP.

Отказ RedBox

Все SAN за единственным RedBox могут потерять связь, даже если обе резервированные сети исправны.

Для критичных устройств предпочтительнее:

- встроенный DANP/DANH;
- два независимых RedBox при поддерживаемой схеме;
- физически раздельные интерфейсы;
- раздельное питание.

7.14. Требования к коммутаторам по сегментам

Функция	PRP-сеть	HSR-кольцо	MRP-кольцо	RSTP-сеть
IEC 62439-3	На конечных узлах/RedBox	На каждом кольцевом узле	Не требуется	Не требуется
IEC 62439-2	Не требуется	Не требуется	На каждом коммутаторе кольца	Не требуется
RSTP/MSTP	Возможно внутри отдельной LAN, если предусмотрено проектом	Не заменяет HSR	Не должно конфликтовать с MRP-кольцом	Обязательно
VLAN/QoS	Да	Да	Да	Да
GOOSE/SV multicast	По проекту	По проекту	Обычно ограниченно	Обычно не критичный
PTP Profile	Для цифровой подстанции	Для процессной шины	При передаче PTP	При передаче PTP
RedBox	Для SAN или сопряжения	Для SAN или сопряжения	Обычно не нужен	Обычно не нужен

7.15. Основные проектные ошибки

Формальное удвоение PRP без физического разделения

Если LAN_A и LAN_B:

- находятся в одном кабельном лотке;
- питаются от одного автомата;
- установлены в одном незащищённом шкафу;
- используют общий оптический кабель;
- зависят от одного источника времени,

одна авария может вывести из строя обе сети.

Одно большое HSR-кольцо

Большое число Merging Unit и SV-потоков повышает загрузку и задержку. Разделение на кольца по присоединениям обычно проще для расчёта и эксплуатации.

Передача сервисного трафика через процессную шину

Резервные копии, обновления ПО или видеопотоки могут влиять на очереди и буферы, даже если помещены в низкий приоритет.

Единственный RedBox для группы критичных IED

Резервируется дальнейшая сеть, но RedBox остаётся общей точкой отказа.

Совмещение MRP и RSTP на одном кольце

Два механизма могут одновременно пытаться управлять одной петлёй. На одной физической топологии должен действовать один заранее выбранный протокол резервирования, если производитель прямо не описывает иной совместимый режим.

Отсутствие испытаний при полной нагрузке

Проверка только отключением кабеля при почти пустой сети недостаточна. Испытания должны включать:

- полную SV-нагрузку;
- множество GOOSE-потоков;
- PTP;
- передачу MMS;
- потерю сети A или B;
- разрыв HSR;
- разрыв MRP;
- смену Grandmaster;
- восстановление повреждённого сегмента;
- второй отказ при уже деградированной сети.

7.16. Практический вариант для крупной цифровой подстанции

Наиболее сбалансированная архитектура может выглядеть так:

1. **Станционная шина:** PRP LAN_A/LAN_B.
2. **Процессная шина:** отдельное HSR-кольцо для каждого присоединения или группы тесно связанных функций.
3. **Межсекционные защиты:** отдельный PRP-сегмент либо рассчитанная передача между HSR-кольцами.
4. **Система времени:** два Grandmaster, PTP IEC/IEEE 61850-9-3, PTP-aware PRP/HSR.
5. **Управление сетью:** отдельная сервисная VLAN или физическая сеть.
6. **Сервисные здания и шкафы:** MRP-кольца.

7. **Административная инфраструктура:** RSTP/MSTP.
8. **Граница с корпоративной сетью:** маршрутизатор и межсетевой экран.
9. **Диагностика:** контроль деградации PRP, разрывов HSR/MRP, состояния PTP и загрузки multicast.

8. Требования к промышленным коммутаторам разных уровней подстанции

Набор требований к подстанционному коммутатору определяется его местом в архитектуре. Станционный коммутатор агрегирует связи между терминалами, серверами и шлюзами. Оборудование процессной шины передаёт GOOSE и Sampled Values с минимальной задержкой. Сервисный коммутатор обслуживает диагностику, инженерный доступ и вспомогательные системы.

Общими остаются требования к промышленному исполнению, электромагнитной совместимости, питанию, управлению и устойчивости программного обеспечения. Поддержка PRP, HSR, RedBox, PTP, SyncE или TSN выбирается с учётом роли конкретного узла.

8.1. Конструктивное исполнение и условия эксплуатации

IEC 61850-3 устанавливает общие требования к конструкции, безопасности и условиям эксплуатации оборудования связи и автоматизации на электростанциях и подстанциях. Стандарт рассматривает электромагнитные воздействия, климатические и механические факторы, требования к электропитанию и электрической прочности.

Для промышленного коммутатора это выражается в нескольких группах характеристик.

Устойчивость к электромагнитным воздействиям. Оборудование работает рядом с коммутационными аппаратами, силовыми кабелями и цепями оперативного тока. В такой среде возможны электростатические разряды, быстрые переходные процессы, импульсные помехи, радиочастотные поля и наведённые напряжения. Конструкция печатных плат, экранирование, фильтрация цепей питания и заземление корпуса должны соответствовать установленным уровням испытаний.

Питание. На подстанциях применяются цепи переменного и постоянного тока с широкими рабочими диапазонами. Коммутатор должен переносить предусмотренные проектом провалы, кратковременные прерывания, пульсации и импульсные перенапряжения. Для ответственных узлов обычно предусматривают два независимых ввода питания. Полезна релейная сигнализация исчезновения одного ввода, поскольку коммутатор может продолжать работу, оставаясь без резерва.

Температура и охлаждение. Оборудование в наружных шкафах и неотапливаемых помещениях эксплуатируется при температурах, недопустимых для обычной офисной техники. Безвентиляторное охлаждение снижает зависимость от движущихся деталей и уменьшает поступление пыли внутрь корпуса. Тепловой расчёт должен учитывать установку нескольких устройств вплотную на DIN-рейке или в стойке.

Механическая стойкость. Конструкция разъёмов, креплений и корпуса рассчитывается с учётом вибрации и ударов. Для оптических портов важны фиксация модулей и устойчивость соединения к механическим воздействиям.

Электробезопасность и изоляция. Развязка интерфейсов и цепей питания должна выдерживать воздействия, характерные для электроэнергетического объекта. Требования относятся к изоляционным промежуткам, электрической прочности и защите персонала.

Само по себе промышленное исполнение не характеризует сетевые возможности устройства. Коммутатор может выдерживать подстанционные воздействия, но не поддерживать нужный профиль PTP, обработку HSR-кадров или требуемую производительность при передаче SV.

8.2. Производительность и задержка

Для обычной корпоративной сети часто достаточно указать скорость портов и пропускную способность коммутационной матрицы. В подстанционной сети дополнительно оцениваются:

- задержка прохождения Ethernet-кадра;
- разброс задержки;
- скорость обработки коротких кадров;
- поведение очередей при кратковременной перегрузке;
- число одновременно обрабатываемых многоадресных потоков;
- производительность механизмов PRP, HSR и FRER;
- задержка аппаратных временных меток PTP;
- отсутствие блокировок при одновременной передаче между несколькими портами.

Неблокирующая коммутационная матрица (Non-blocking Switching Fabric) позволяет одновременно обслуживать все порты на их номинальной скорости в предусмотренных режимах. Однако коммутационная матрица составляет только часть тракта. Потери могут возникать в очередях выходных портов, при обработке многоадресных кадров или при превышении возможностей таблиц потоков.

Большой буфер также не является безусловным преимуществом. Он помогает пережить кратковременный всплеск нагрузки, но длительное хранение кадров увеличивает задержку. Для процессной шины важнее предсказуемое управление очередями и корректное ограничение некритичного трафика.

8.3. VLAN, QoS и многоадресный трафик

Виртуальные локальные сети разделяют трафик разных функций и ограничивают широковещательные домены. Приоритет IEEE 802.1p используется для выбора очереди, однако одинаковая метка приоритета на всех устройствах не решает задачу без согласованного плана обслуживания очередей.

Коммутатор должен различать классы трафика и сохранять ресурсы для критичных потоков. При перегрузке GOOSE и SV не должны блокироваться длительной передачей архивов, файлов конфигурации или видеоданных.

GOOSE и Sampled Values передаются как многоадресные кадры канального уровня. Обычный протокол IGMP Snooping работает с многоадресным IP-трафиком и не управляет такими кадрами. Для ограничения GOOSE и SV применяются статические таблицы многоадресных MAC-адресов, протоколы регистрации либо специализированная фильтрация IEC 61850.

При выборе механизма необходимо учитывать изменение подписчиков и резервных путей. Слишком жёсткая статическая фильтрация способна заблокировать трафик после перестроения сети, а бесконтрольное распространение multicast повышает нагрузку на все порты.

8.4. Синхронизация времени

Поддержка IEEE 1588 ещё не означает совместимость с энергетическим профилем IEC/IEEE 61850-9-3. Коммутатор должен работать в требуемом режиме прозрачных или граничных часов и формировать аппаратные временные метки.

Для прозрачных часов важны точность измерения времени пребывания пакета внутри коммутатора и корректировка соответствующего поля PTP. Для граничных часов дополнительно требуется качественный внутренний генератор, управление источниками времени и предсказуемое переключение между ними.

Поддержка SyncE включает восстановление частоты из принимаемого сигнала, синхронизацию исходящих интерфейсов и выбор источника с учётом его качества. Такая функция имеет смысл только при построении сквозного синхронного тракта.

8.5. Управление, диагностика и информационная безопасность

Подстанционная сеть должна оставаться наблюдаемой при штатной работе и после частичного отказа. Коммутатору необходимы средства контроля:

- состояние портов и оптических линий;
- загрузка интерфейсов и очередей;
- ошибки и отброшенные кадры;
- состояние MRP, RSTP, PRP или HSR;
- потеря одного из резервных путей;
- параметры PTP и выбранный источник времени;
- изменение конфигурации;
- события питания и перезагрузки.

Для централизованного управления применяются защищённый сетевой протокол управления SNMPv3, системный журнал Syslog, синхронизация журналов и передача аварийных уведомлений. Зеркалирование портов помогает анализировать GOOSE, SV и PTP с помощью сетевого анализатора.

К функциям защиты относятся разделение сети на VLAN, списки управления доступом, аутентификация по IEEE 802.1X, разграничение прав пользователей, защищённые протоколы SSH и HTTPS, отключение неиспользуемых сервисов, контроль целостности программного обеспечения и журналирование административных действий.

Защита интерфейса управления не должна влиять на прохождение критического трафика. Перегрузка центрального процессора запросами управления или широковещательными пакетами не должна останавливать аппаратную коммутацию GOOSE и SV.

8.6. Коммутатор станционной шины

Станционная сеть объединяет серверы, автоматизированные рабочие места, шлюзы, контроллеры и терминалы присоединений. В ней одновременно присутствуют MMS, GOOSE, PTP, служебный трафик и данные управления.

Для станционного коммутатора приоритетны:

- высокая плотность оптических и медных портов;
- гигабитные порты доступа и высокоскоростные магистральные интерфейсы;
- неблокирующая коммутация;
- VLAN, QoS и фильтрация многоадресного трафика;
- энергетический профиль PTP;
- средства сетевой диагностики;
- функции информационной безопасности;
- два ввода питания и промышленное исполнение;
- поддержка PRP или взаимодействие с PRP-архитектурой.

В PRP-сети коммутатор LAN A или LAN B может пересылать кадры как обычное Ethernet-оборудование. Встроенная поддержка PRP требуется, если устройство само выполняет функции DANP, RedBox или соединяет резервированные сегменты.

Для крупных станционных сетей полезны маршрутизация, списки доступа, агрегирование каналов и протокол нескольких связующих деревьев (Multiple Spanning Tree Protocol, MSTP). Эти функции относятся к общей архитектуре и не являются обязательными для каждого коммутатора IEC 61850.

8.7. Коммутатор процессной шины

Процессная сеть предъявляет наиболее жёсткие требования к задержке и обработке непрерывных потоков. Через неё проходят GOOSE, Sampled Values и сообщения синхронизации.

Основными характеристиками становятся:

- малая и стабильная задержка;
- высокая скорость обработки коротких кадров;
- производительность на скорости линии (Wire-speed);
- обработка большого количества L2 multicast;
- аппаратная приоритизация;
- энергетический профиль PTP с аппаратными временными метками;
- HSR, PRP или функции RedBox в соответствии с топологией;
- подробная диагностика каждого резервного направления;
- высокая устойчивость к электромагнитным воздействиям;
- минимальное время загрузки и восстановления после перезапуска.

Для HSR-коммутатора дополнительно важна производительность транзитной пересылки. Он обслуживает собственный трафик и кадры остальных участников кольца. Перегрузка одного узла влияет на задержку всего пути.

В процессной сети желательно аппаратное выполнение критичных функций. Передача кадров, удаление дубликатов, формирование временных меток и управление очередями не должны зависеть от загрузки центрального процессора.

8.8. Коммутатор сервисной сети

Сервисный сегмент используется для диагностики, настройки, видеонаблюдения, телефонии, контроля доступа и других вспомогательных систем. Задержка здесь обычно менее критична, но возрастает значение сегментации и контроля доступа.

Для такого коммутатора важны:

- MRP, RSTP или MSTP;
- VLAN и списки управления доступом;
- SNMPv3, Syslog и централизованная аутентификация;
- зеркалирование портов;
- возможность питания устройств по Ethernet, если это требуется вспомогательным системам;
- ограничение широковещательного и многоадресного трафика;
- функции защиты от петель и ошибочного подключения;
- маршрутизация между сервисными сегментами, если она предусмотрена проектом.

Сервисная сеть может иметь более простую систему синхронизации и резервирования. При этом её отказ не должен нарушать передачу GOOSE и SV. Для этого сервисный трафик отделяется от процессной шины физически либо с помощью управляемых сетевых границ.

8.9. Сравнение требований по уровням сети

Характеристика	Станционный коммутатор	Коммутатор процессной шины	Сервисный коммутатор
Основные потоки	MMS, GOOSE, PTP, управление	GOOSE, SV, PTP	Диагностика, настройка, видео, служебные данные
Главный приоритет	Доступность и масштабирование	Минимальная задержка и предсказуемость	Управляемость и сегментация
Типовое резервирование	PRP, иногда MRP или RSTP	HSR или PRP	MRP, RSTP или MSTP
Требования к задержке	Высокие для GOOSE, умеренные для MMS	Наиболее жёсткие	Обычно умеренные
Multicast	GOOSE и часть служебных потоков	Большой объём GOOSE и SV	Зависит от подключённых систем
Синхронизация	PTP, иногда SyncE	PTP обязателен для ряда применений, SyncE по проекту	NTP или PTP по необходимости
Порты	Высокая плотность, оптические магистрали	Оптика, кольцевые или резервированные соединения	Медь и оптика, при необходимости PoE
Диагностика	Расширенная	Максимально подробная, включая резервирование и PTP	Стандартные сетевые средства
Информационная безопасность	Высокие требования к управлению и сегментации	Жёсткое ограничение доступа и потоков	Контроль пользователей и подключаемых устройств
TSN	Перспективно для конвергентной сети	Наибольшая практическая ценность	Может применяться для совместимости общей инфраструктуры

9. Применение TSN в электроэнергетике

9.1. Назначение TSN

Сети с учётом времени (Time-Sensitive Networking, TSN) представляют собой семейство стандартов IEEE 802.1 для детерминированной передачи данных по Ethernet. В состав TSN входят механизмы синхронизации, планирования передачи, управления потоками, резервирования и контроля трафика.

TSN позволяет размещать в общей инфраструктуре потоки с разными требованиями. Для критичных данных резервируются время и сетевые ресурсы, а обычный трафик использует оставшуюся пропускную способность. Результат зависит от согласованной работы всех коммутаторов, конечных устройств и системы конфигурирования.

IEC TR 61850-90-13 рассматривает применение детерминированных сетевых технологий в автоматизации электроэнергетики, вопросы совместимости с существующими решениями и возможные пути перехода.

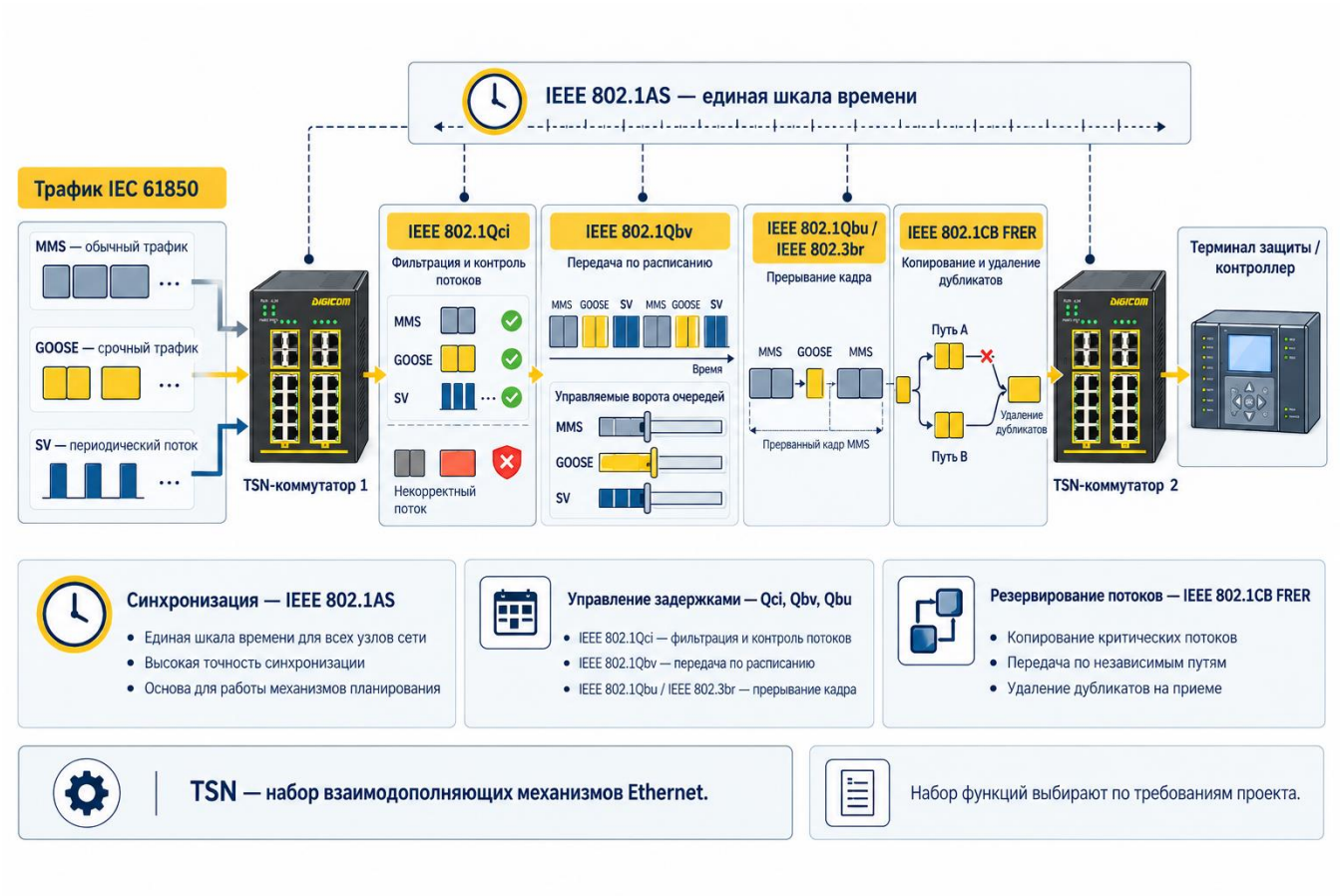
Профиль TSN для промышленной автоматизации определён IEC/IEEE 60802:2026. Документ выбирает функции, параметры, протоколы и процедуры для мостов, конечных станций и локальных сетей промышленного назначения.

9.2. Основные механизмы TSN

TSN состоит из отдельных функций, каждая из которых решает свою часть задачи.

Механизм	Стандарт	Назначение	Применение в энергетике
Синхронизация времени	IEEE 802.1AS	Формирование общей шкалы времени в TSN-домене	Согласование расписаний передачи и временных функций
Передача по расписанию	IEEE 802.1Qbv	Открытие и закрытие очередей в заданные интервалы	Выделение временных окон для SV и других периодических потоков
Прерывание кадров	IEEE 802.1Qbu и IEEE 802.3br	Приостановка длинного некритичного кадра ради срочного	Снижение задержки GOOSE при одновременной передаче крупных пакетов
Фильтрация и контроль потока	IEEE 802.1Qci	Ограничение скорости и проверка отдельных потоков	Локализация ошибочного или чрезмерного трафика
Репликация и удаление кадров	IEEE 802.1CB	Передача копий по разным путям и удаление дубликатов	Бесшовная защита выбранных потоков
Настройка потоков и ресурсов	IEEE 802.1Qcc	Централизованная или распределённая конфигурация	Расчёт маршрутов, резервирование полосы и настройка коммутаторов

Механизм	Стандарт	Назначение	Применение в энергетике
Асинхронное формирование трафика	IEEE 802.1Qcr	Управление задержкой без общего циклического расписания	Возможный вариант для смешанных потоков в сложной сети



9.3. Синхронизация IEEE 802.1AS и профиль IEC 61850-9-3

Обобщённый протокол точного времени (Generalized Precision Time Protocol, gPTP) по IEEE 802.1AS создаёт общую временную основу для TSN. Передача по расписанию IEEE 802.1Qbv использует время IEEE 802.1AS для согласованного управления очередями. Актуальная редакция IEEE 802.1AS описывает синхронизацию чувствительных ко времени приложений при нормальной работе и изменении состава сети.

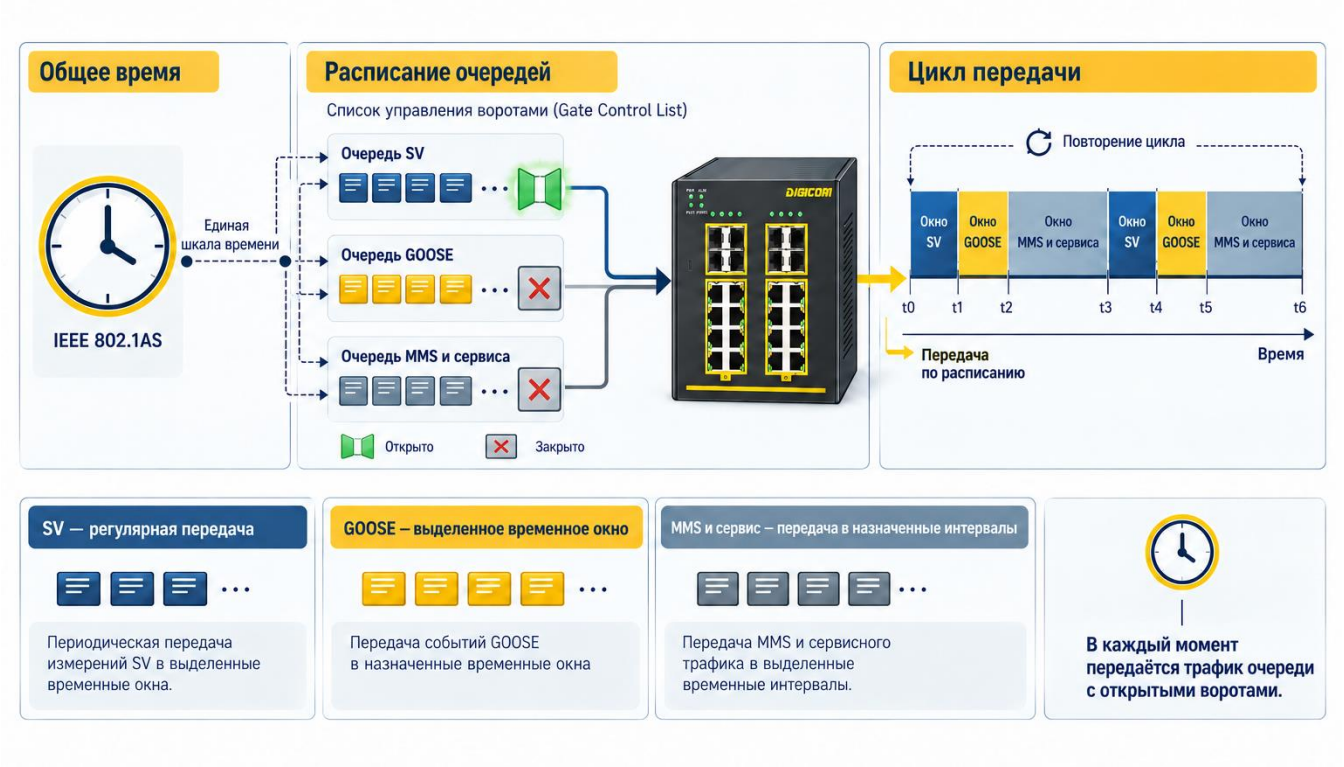
Энергетический профиль IEC/IEEE 61850-9-3 и IEEE 802.1AS основаны на PTP, но имеют разные наборы правил и параметров. Их нельзя считать автоматически взаимозаменяемыми. Проект должен определить применяемый профиль, временные области и способ взаимодействия между ними.

Если GOOSE и SV передаются через TSN-домен, синхронизация расписаний может использовать IEEE 802.1AS, а прикладные устройства подстанции — IEC/IEEE 61850-9-3. В таком случае требуется согласованная архитектура времени: совместимые часы, поддержка нескольких профилей либо контролируемая граница между временными доменами.

SyncE может использоваться как дополнительный источник стабильной частоты. Он не заменяет gPTP или PTP, поскольку расписание TSN требует общей фазовой шкалы времени.

9.4. Передача по расписанию IEEE 802.1Qbv

Формирователь трафика с учётом времени (Time-Aware Shaper) управляет выходными очередями по повторяющемуся расписанию. В определённый интервал открывается очередь критичного потока, а остальные очереди временно закрываются.



Периодические потоки SV хорошо подходят для передачи по расписанию: частота их появления известна, а сетевые ресурсы можно зарезервировать заранее. GOOSE имеет событийный характер и не всегда укладывается в заранее фиксированный момент. Для него может выделяться регулярно повторяющееся окно либо использоваться высокоприоритетная внеплановая передача.

Расписание должно быть согласовано на всех коммутаторах вдоль маршрута. Ошибка в одном узле способна закрыть очередь в момент прихода критичного кадра и увеличить задержку. Поэтому TSN требует единой конфигурационной модели и контроля её целостности.

IEEE 802.1Qbv определяет передачу кадров по времени, связанному с IEEE 802.1AS. Одновременно в одной локальной сети могут обслуживаться плановый, формируемый и обычный трафик.

9.5. Прерывание низкоприоритетных кадров

Даже при строгой очередности срочный кадр может поступить во время передачи длинного низкоприоритетного кадра. Ethernet-порт не может начать следующий кадр до окончания текущей передачи.

Механизм прерывания кадров (Frame Preemption) разделяет трафик на срочный и прерываемый. Передача длинного прерываемого кадра временно приостанавливается, затем через линию проходит срочный кадр, после чего исходная передача продолжается.

Функция активируется только при её поддержке обоими устройствами на конкретной линии. Она уменьшает максимальное время ожидания для GOOSE и других срочных потоков, особенно на портах с относительно невысокой скоростью.

9.6. Контроль отдельных потоков IEEE 802.1Qci

Фильтрация и контроль отдельных потоков (Per-Stream Filtering and Policing) позволяют коммутатору проверять каждый заранее определённый поток. Для него задаются допустимая скорость, размер кадров, временные параметры и класс обслуживания.

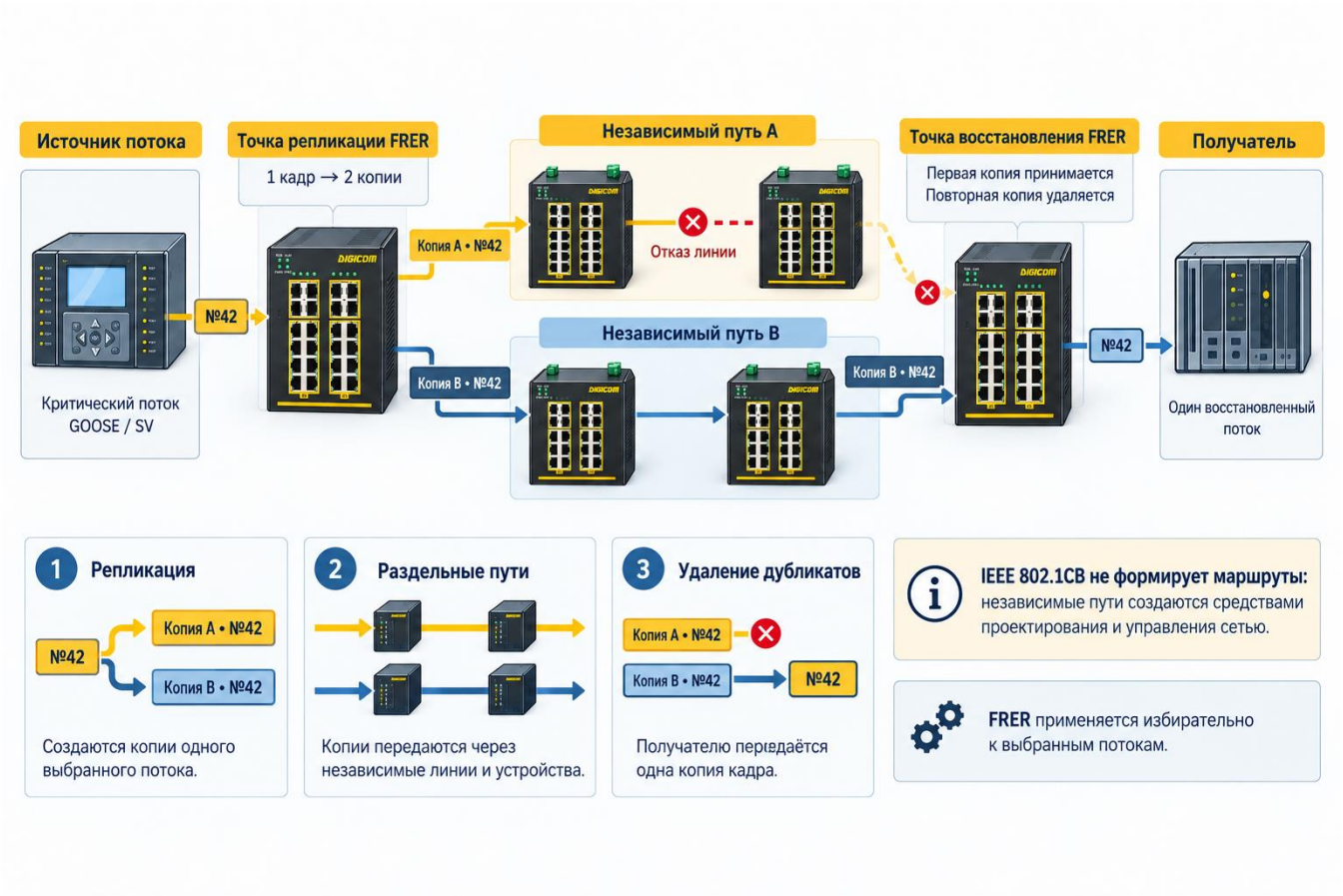
Если устройство начинает передавать больше данных, чем предусмотрено конфигурацией, коммутатор может отбросить избыточные кадры до их распространения по сети. Это ограничивает влияние неисправного или ошибочно настроенного источника на остальные потоки.

IEEE 802.1Qci предусматривает подсчёт, фильтрацию, контроль и назначение класса обслуживания с учётом конкретного потока и временного расписания.

Для процессной шины такой механизм особенно полезен. Некорректный поток SV либо лавина сообщений от одного устройства не должны занимать ресурсы, зарезервированные для других защит и измерительных каналов.

9.7. FRER по IEEE 802.1CB

Репликация кадров и удаление дубликатов для повышения надёжности (Frame Replication and Elimination for Reliability, FRER) защищает отдельные потоки. На точке репликации кадру присваивается последовательный номер и создаются копии. Они передаются по разным маршрутам, а в точке восстановления первая копия принимается, повторные удаляются.



IEEE 802.1CB определяет идентификацию потоков, репликацию, распознавание и удаление дубликатов. Формирование независимых маршрутов в область этого стандарта не входит.

Это различие существенно для проектирования. Включение FRER без настройки физически раздельных путей создаёт дублирование кадров, но не защищает от общего повреждения. Маршруты должны рассчитываться средствами управления сетью и проходить через независимые линии и устройства в пределах принятой модели отказов.

В отличие от PRP и HSR, FRER может применяться избирательно. Критичный поток GOOSE или SV реплицируется, а MMS и служебные данные передаются одним маршрутом. Точки репликации и восстановления могут находиться в конечных устройствах либо в промежуточных TSN-коммутаторах.

9.8. Заменяет ли TSN протоколы PRP, HSR, MRP и RSTP

TSN не является единым протоколом резервирования. Его функции могут принять на себя часть задач существующих технологий, но результат зависит от состава механизмов и архитектуры сети.

FRER близок к PRP и HSR по принципу передачи нескольких копий кадра. Различаются область применения и организация путей. PRP использует две параллельные сети, HSR — два направления кольца, а FRER работает с выбранными потоками и допускает более гибкое размещение точек репликации.

MRP и RSTP управляют активной топологией и исключают Ethernet-петли. FRER не строит маршруты и не восстанавливает связность для незащищённого трафика. Даже при использовании FRER сети может потребоваться MRP, RSTP, маршрутизация либо централизованное управление путями.

Параметр	PRP	HSR	FRER	MRP/RSTP
Объект резервирования	Весь трафик узла	Весь трафик узла в кольце	Выбранный поток	Сетевая топология
Способ защиты	Две независимые LAN	Два направления кольца	Копии по заданным маршрутам	Активация запасного пути
Перестроение после единичного отказа	Не требуется	Не требуется	Не требуется при исправном втором маршруте	Требуется
Создание маршрутов	Задано архитектурой двух LAN	Задано кольцом	Выполняется другими механизмами	Выполняется самим протоколом топологии
Требования к конечным устройствам	PRP или RedBox	HSR или RedBox	FRER в конечном или промежуточном узле	Обычно отсутствуют
Избирательность	На уровне узла	На уровне узла	На уровне отдельных потоков	На уровне сети или VLAN
Типичное место применения	Станционная шина	Процессное кольцо	TSN-сеть с управляемыми потоками	Сервисные и общие сегменты

На действующих подстанциях вероятна длительная совместная эксплуатация технологий. PRP может использоваться на станционной шине, HSR — в существующих процессных кольцах, FRER — для новых TSN-потоков, а MRP или RSTP — в сервисных сегментах. Переход к TSN в таком случае выполняется поэтапно, без одновременной замены всей инфраструктуры.

9.9. Требования к TSN-коммутатору для энергетики

Поддержка TSN требует сочетания аппаратных и программных функций:

- синхронизация IEEE 802.1AS и, при необходимости, IEC/IEEE 61850-9-3;
- аппаратное управление очередями по IEEE 802.1Qbv;
- прерывание кадров IEEE 802.1Qbu и IEEE 802.3br;
- фильтрация потоков IEEE 802.1Qci;
- репликация и удаление дубликатов IEEE 802.1CB;
- конфигурирование потоков и ресурсов;
- достаточное количество таблиц потоков и правил;
- аппаратные счётчики нарушений и потерь;
- согласованное поведение при потере синхронизации;
- совместимость с промышленным профилем IEC/IEEE 60802;
- исполнение и испытания по требованиям подстанционной среды.

Практическая ценность TSN определяется поддерживаемым набором функций. Коммутатор только с IEEE 802.1AS либо только с планировщиком IEEE 802.1Qbv не способен самостоятельно реализовать все задачи детерминированной, резервированной и управляемой сети.

10. Подстанционная сеть как единая инженерная система

10.1. Взаимосвязь технологий

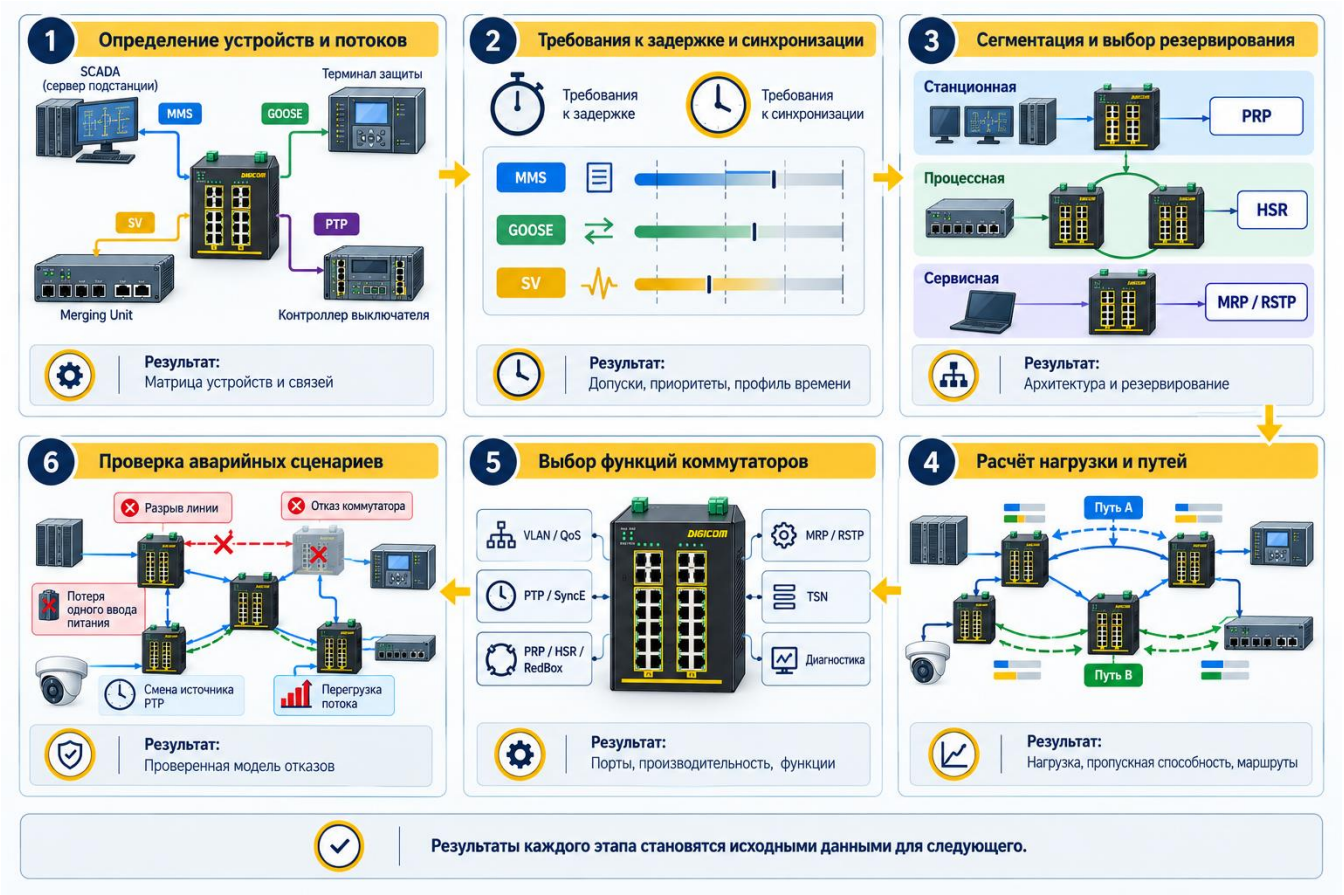
Каждая рассмотренная технология отвечает за определённую часть сетевой архитектуры:

Задача	Технология или стандарт	Роль коммутатора
Работа в подстанционной среде	IEC 61850-3	Стойкость к питанию, помехам, температуре и механическим воздействиям
Диспетчерский обмен	MMS по IEC 61850-8-1	Надёжная коммутация TCP/IP, VLAN, QoS и диагностика
Быстрые события	GOOSE по IEC 61850-8-1	Малая задержка, приоритеты и управление L2 multicast
Потоковые измерения	Sampled Values по IEC 61850-9-2	Высокая производительность, контроль загрузки и предсказуемые очереди
Единая шкала времени	IEC/IEEE 61850-9-3	Прозрачные или граничные часы PTP
Стабильная частота	SyncE	Передача частоты через физический уровень
Бесшовное резервирование	PRP и HSR	Передача резервированных кадров или функции RedBox
Восстановление кольца	MRP	Управление кольцевой топологией
Резервирование общей топологии	RSTP/MSTP	Выбор активных путей и блокировка петель
Детерминированная передача	TSN	Планирование, контроль, резервирование и настройка потоков
Защита отдельных потоков	FRER	Репликация, идентификация и удаление дубликатов

Эти функции нельзя выбирать независимо друг от друга. Например, схема резервирования меняет пути PTP, а изменение временного профиля влияет на расписание TSN. Настройка приоритетов связана с количеством GOOSE и SV, а архитектура RedBox определяет точки концентрации трафика и отказов.

10.2. Последовательность проектирования

Проектирование целесообразно начинать с функций подстанции и потоков данных.



Сначала определяется состав устройств и информационных связей: кто публикует GOOSE и SV, кто выступает клиентом MMS, какие узлы получают PTP. Затем задаются допустимые задержки, классы приоритетов и требования к сохранению связи.

После этого сеть разделяется на станционные, процессные и сервисные сегменты. Для каждого выбирается механизм резервирования. На основании полученной топологии рассчитываются пропускная способность, загрузка портов, количество многоадресных потоков и задержки по каждому критичному маршруту.

Завершающий этап включает проверку отказов. Анализируются обрыв каждой линии, отказ коммутатора, потеря одного ввода питания, смена источника PTP, разрыв HSR-кольца, потеря LAN A или LAN B, отказ RedBox и перегрузка отдельным потоком.

10.3. Роль производителя подстанционных коммутаторов

Производитель должен учитывать одновременно физические условия эксплуатации и сетевые задачи. Аппаратная платформа должна соответствовать подстанционной среде, а коммутационная часть — обрабатывать критичные потоки с предсказуемой задержкой.

Функциональная архитектура коммутатора включает несколько уровней:

- аппаратную коммутацию и очереди;
- механизмы резервирования;
- обработку PTP и SyncE;
- управление многоадресным трафиком;
- диагностику и регистрацию событий;
- информационную безопасность;
- централизованную настройку и мониторинг;
- поддержку TSN для новых детерминированных сетей.

Универсальная модель со всеми функциями не всегда экономически оправданна. Для станционной, процессной и сервисной сети требуются разные сочетания портов, производительности и протоколов. Рациональная линейка промышленного оборудования должна учитывать эти роли и сохранять общие принципы управления, диагностики и эксплуатации.

10.4. Итог

Ethernet стал общей коммуникационной основой цифровой подстанции, но его применение в электроэнергетике требует специализированной архитектуры. IEC 61850 определяет модели обмена и типы критичного трафика. IEC 61850-3 задаёт требования к работе оборудования в подстанционной среде. PRP, HSR, MRP и RSTP решают разные задачи резервирования. RedBox связывает обычные устройства с бесшовно резервированными сетями. PTP и SyncE формируют временную и частотную основу. TSN добавляет управление ресурсами и детерминированную передачу отдельных потоков.

Надёжность такой сети складывается из независимости резервных путей, корректной приоритизации, точной синхронизации, достаточной производительности и устойчивости самого оборудования. Ошибка в любом из этих элементов способна снизить эффективность остальных механизмов.

Поэтому подстанционный коммутатор следует рассматривать как часть системы защиты, измерения и управления. Его конструкция, сетевые функции и поведение при отказах должны соответствовать задачам конкретного уровня подстанции и общей модели надёжности объекта.

11. Оборудование DIGICOM для Ethernet-сетей электроэнергетики

11.1 Промышленные коммутаторы L2/L3 для электроэнергетики

Серия ZIRCON2828HP



Стоечный промышленный коммутатор L2 для станционной шины: уровень доступа, агрегация терминалов и построение отдельной сети LAN A или LAN B в архитектуре PRP. Также подходит для сервисной сети и уровня присоединения.

Основная роль: станционная шина L2

ZIRCON2828HP логично использовать как коммутатор доступа или агрегации второго уровня.

К нему могут подключаться:

- терминалы релейной защиты и автоматики;
- контроллеры присоединений;
- шлюзы и контроллеры телемеханики;
- серверы и автоматизированные рабочие места;
- другие коммутаторы уровня присоединения.

Четыре интерфейса SFP+ позволяют организовать высокоскоростные восходящие соединения, кольцо или агрегированные каналы. Конфигурация **4X24GX** с 24 оптическими портами подходит для распределённой подстанционной сети с оптическими линиями до шкафов присоединений. Конфигурация **4X24GE** с 24 портами RJ45 удобнее для серверного помещения или локального подключения IED.

Поддержка VLAN, восьми очередей, IEEE 802.1p, GMRP и фильтрации потоков соответствует основным задачам передачи MMS и GOOSE на станционном уровне. Для резервирования доступны MRP, RSTP/MSTP, ERPS и DG-Ring.

Применение в PRP-сети

ZIRCON2828HP можно использовать внутри одной из параллельных сетей PRP:

- один комплект коммутаторов формирует LAN A;
- второй независимый комплект формирует LAN B;
- дублирование и удаление кадров выполняют конечные устройства DANP или внешние RedBox.

Самому коммутатору в такой схеме встроенная поддержка PRP не требуется. Каждая сеть должна быть физически и логически независимой. Соединять LAN A и LAN B через один ZIRCON2828HP нельзя.

Уровень присоединения

Серия подходит для агрегации терминалов одного или нескольких присоединений, особенно в варианте с оптическими портами. Её возможности достаточны для VLAN-разделения, приоритизации GOOSE, диагностики и подключения к станционному ядру по 10-гигабитным каналам.

При этом стоечное исполнение 19″ ориентирует модель на центральные помещения и шкафы связи. Для распределённой установки непосредственно около первичного оборудования компактные DIN-коммутаторы могут быть удобнее.

Сервисная сеть

ZIRCON2828HP может работать как стоечный L2-коммутатор сервисной сети:

- видеонаблюдение без PoE;
- инженерный доступ;
- системы мониторинга;
- телефония;
- контроль доступа;
- диагностические серверы.

Для этого имеются VLAN, ACL, 802.1X, RADIUS/TACACS+, SNMPv3, Syslog, зеркалирование портов и защита от сетевых штормов. Отсутствие PoE ограничивает прямое подключение камер и точек доступа с питанием по Ethernet.

Серия ZIRCON3828HP



Стоечный промышленный коммутатор L3 для ядра и агрегации станционной или сервисной сети, с маршрутизацией между VLAN и высокоскоростными оптическими соединениями; может применяться в каждой из независимых сетей PRP LAN A или LAN B.

Основная роль: ядро или агрегация станционной сети

ZIRCON3828HP имеет ту же портовую архитектуру и коммутационную производительность, что и ZIRCON2828HP, но дополнен функциями третьего уровня:

- статическая и динамическая маршрутизация;
- RIP и OSPF;
- протокол резервирования шлюза VRRP;
- IPv4 и IPv6;
- маршрутизация между VLAN;
- ACL уровня L2–L4.

Это делает ZIRCON3828HP более подходящим для центрального узла станционной сети, где требуется объединить несколько VLAN, сегменты присоединений, серверную инфраструктуру и контролируемый выход к смежным сетям.

Встроенный L3-коммутатор может выполнять межсегментную маршрутизацию, но не заменяет промышленный межсетевой экран на границе технологических и корпоративных зон.

Применение в PRP-сети

Как и ZIRCON2828HP, серия ZIRCON3828HP может использоваться в качестве обычного коммутатора внутри LAN A или LAN B. Для каждой сети устанавливается отдельный экземпляр с независимыми линиями и питанием.

L3-функции в пределах PRP-сегмента следует применять осторожно: обе параллельные сети должны сохранять согласованную конфигурацию, а маршрутизация не должна создавать неконтролируемое соединение LAN A и LAN B.

Ядро сервисной сети

ZIRCON3828HP хорошо соответствует роли центрального коммутатора сервисной сети подстанции. Он может маршрутизировать трафик между VLAN видеонаблюдения, инженерного доступа, телефонии и систем безопасности, поддерживает VRRP, ACL и централизованную аутентификацию.

По сравнению с ZIRCON2828HP эта роль оправданна, когда маршрутизация действительно выполняется на промышленном коммутаторе. Если все сервисные VLAN завершаются на отдельном межсетевом экране, возможностей ZIRCON2828HP может быть достаточно.

Процессная шина

Для чистой процессной шины L3-функции обычно не нужны: GOOSE и SV передаются на канальном уровне. Поэтому ZIRCON3828HP не получает принципиального преимущества перед ZIRCON2828HP по обработке таких потоков.

Допускается его применение как агрегирующего узла нескольких процессных сегментов, если проект предусматривает обычную коммутируемую топологию.

Наиболее обоснованная роль обеих серий — **станционная шина**: ZIRCON2828HP как L2-коммутатор доступа и агрегации, ZIRCON3828HP как L3-коммутатор ядра и распределения.

Общие характеристики

Обе серии имеют практически одинаковую коммутационную платформу:

- 24 порта доступа — медные RJ45 либо оптические SFP;
- четыре uplink порта SFP+ со скоростью 1/2,5/10 Гбит/с;
- коммутацию с промежуточным хранением кадров (Store-and-Forward);
- скорость пересылки 95,232 млн пакетов/с;
- задержка менее 5 мкс;
- таблица 32 тыс. MAC-адресов;
- буфер 32 Мбит;
- восемь выходных очередей;
- VLAN, IEEE 802.1p, QoS, ACL, GMRP, IGMP/MLD Snooping;
- STP/RSTP/MSTP, MRP, ERPS и DG-Ring;
- LACP, зеркалирование портов и ограничение сетевых штормов;
- SNMPv3, RMON, Syslog, SSH, HTTPS, RADIUS и TACACS+;
- два ввода питания;
- пассивное охлаждение, IP40 и диапазон −40…+85 °C.

Главное различие заключается в сетевом уровне:

- ZIRCON2828HP относится к коммутаторам L2 и имеет только ограниченные функции статической маршрутизации;
- ZIRCON3828HP относится к L3 и поддерживает RIP, OSPF, VRRP, IPv4/IPv6 и маршрутизацию между VLAN.

Сравнение применимости

Роль	ZIRCON2828HP	ZIRCON3828HP
Коммутатор доступа станционной шины	**Подходит**	**Подходит**, но функции L3 могут быть избыточны
Коммутатор агрегации станционной шины	**Подходит как L2**	**Хорошо подходит**
Ядро станционной сети	Ограниченно	**Основная рекомендуемая роль**
Коммутатор одной сети PRP — LAN A или LAN B	**Подходит**	**Подходит**
Коммутатор уровня присоединения	**Подходит**	Подходит, если требуется L3
Коммутатор сервисной сети	**Подходит как L2-доступ/агрегация**	**Подходит как L3-ядро**

11.2 Коммутаторы для стационной шины

Для станционной шины лучше всего подходят три группы коммутаторов DIGICOM:

1. **ZIRCON3828SMP** — наиболее полное функциональное соответствие, особенно если коммутатор должен непосредственно поддерживать PRP/HSR или выполнять функции сопряжения резервированных сетей.
2. **ZIRCON3856HP / ZIRCON2856HP** — в качестве основных высокоплотных коммутаторов станционной шины. Для PRP их следует устанавливать попарно: один в сети LAN A, второй в LAN B.
3. **ZIRCON3848HP / ZIRCON2848HP и младшие модели семейств ZIRCON 38xxHP / 28xxHP** — подходят для станционной шины объектов меньшего масштаба или для уровня присоединения.

Наиболее подходящие модели

Серия	Предпочтительная роль	Сильные стороны
ZIRCON3828SMP	Центральный или распределительный коммутатор; узел PRP/HSR; сопряжение станционной и процессной шин	Модульная конструкция, до 24 портов 1 Гбит/с, четыре порта 10 Гбит/с, IEC 61850-3, IEC 61850-8-1, PTP, TSN, PRP/HSR, два сменных блока питания
ZIRCON3856HP	Основной высокоплотный коммутатор станционной шины,	До 56 портов, восемь портов 10 Гбит/с, L3, IEC 61850-3, IEC

Серия	Предпочтительная роль	Сильные стороны
	агрегирование терминалов и серверов	61850-8-1, PTP, развитые VLAN, QoS, ACL, диагностика и средства защиты
ZIRCON2856HP	Высокоплотный L2-коммутатор сети PRP LAN A или LAN B	До 56 портов, восемь портов 10 Гбит/с, IEC 61850-3, IEC 61850-8-1, PTP, резервированные блоки питания
ZIRCON3848HP / 2848HP	Станционная шина средней или большой подстанции	48 портов, восемь портов 10 Гбит/с, версии L3 и L2, IEC 61850 и PTP, два ввода питания
ZIRCON3840HP, 3837HP / 2837HP, 3836HP, 3832HP / 2832HP	Распределительные узлы станционной шины и коммутаторы уровня присоединения	От 32 до 40 портов, высокоскоростные восходящие линии, IEC 61850-3, в большинстве моделей IEC 61850-8-1 и PTP
ZIRCON3828HP / 2828HP, 2824HP	Станционная шина небольшой подстанции, шкаф присоединения	24–28 портов, четыре или восемь портов 10 Гбит/с, IEC 61850, PTP, резервированное питание
CITRINE2500TP-TSN	Компактный коммутатор уровня присоединения, периферийный узел станционной сети	IEC 61850-3, IEC 61850-8-1, PTP, механизмы TSN, MRP и резервированное питание в отдельных исполнениях
CITRINE2516FP	Компактный коммутатор доступа станционной шины с PTP; коммутатор шкафа РЗА или автоматики; подключение терминалов защиты, контроллеров, шлюзов и локальных рабочих мест; агрегация небольшого числа устройств с передачей трафика к вышестоящему коммутатору по оптическим портам.	PTP, VLAN, QoS, резервированное питание
ZIRCON2532HP / 2526HP	Небольшие и вспомогательные станционные сегменты	IEC 61850-3, PTP, VLAN, QoS, резервированные варианты питания

ZIRCON3828SMP имеет наиболее широкий набор специализированных функций: IEC 61850-3, IEC 61850-8-1, PTP, TSN, PRP/HSR, четыре интерфейса 10 Гбит/с и два сменных источника питания. Для PRP/HSR предусмотрен отдельный модуль SM3.8-PRP/HSR-1U.

ZIRCON3856HP располагает восемью интерфейсами 10 Гбит/с и 48 гигабитными портами в оптической, медной или смешанной конфигурации. В характеристиках также заявлены IEC 61850-3, IEC 61850-8-1, IEEE 1588v2, VLAN, QoS, ACL, IGMP/MLD Snooping, SNMPv3, SSH, HTTPS, RADIUS и TACACS+.

У **ZIRCON2856HP** количество и сочетание портов аналогичны, но это коммутатор второго уровня. Такой вариант рационален, если внутри каждой сети станционной шины требуется только коммутация Ethernet, а маршрутизация вынесена на межсетевой экран или отдельный маршрутизатор.

Рекомендации для типовых вариантов сети

Станционная шина с PRP

Наиболее практичная схема:

- один **ZIRCON3856HP** или **ZIRCON2856HP** обслуживает сеть LAN A;
- второй коммутатор той же модели и конфигурации обслуживает LAN B;
- между LAN A и LAN B отсутствуют обычные межкоммутаторные соединения;
- двухпортовые конечные устройства подключаются непосредственно к обеим сетям;
- однопортовые устройства подключаются через RedBox.

Промежуточному коммутатору внутри LAN A или LAN B необязательно самостоятельно поддерживать PRP. Дублирование кадров выполняют конечные узлы с двойным подключением и RedBox. Поэтому отсутствие PRP в характеристиках ZIRCON3856HP и ZIRCON2856HP не препятствует их использованию в качестве коммутаторов отдельных сетей PRP.

Если же один сетевой узел должен непосредственно выполнять функции PRP/HSR или сопрягать обычные и резервированные сегменты, более подходящим вариантом будет **ZIRCON3828SMP с модулем PRP/HSR**.

Станционная шина без PRP

Для резервирования на основе MRP, ERPS, MSTP или фирменного кольцевого протокола могут применяться:

- ZIRCON3856HP или ZIRCON2856HP — для центрального узла;
- ZIRCON3848HP или ZIRCON2848HP — для сети средней плотности;
- ZIRCON3832HP, ZIRCON2832HP, ZIRCON3828HP или ZIRCON2828HP — для отдельных распределительных узлов.

Небольшая подстанция или шкаф присоединения

Для компактного объекта могут быть достаточны:

- ZIRCON2824HP;
- ZIRCON2828HP;
- ZIRCON2532HP;
- CITRINE2500TP-TSN;
- CITRINE2516FP.

CITRINE2500TP-TSN особенно интересен там, где предполагается применение механизмов сети, чувствительной ко времени (Time-Sensitive Networking, TSN).

Рекомендуемые варианты

Для крупной подстанции и смешанного подключения:

- **ZIRCON3856HP-8X24GX24GE** с двумя блоками питания требуемого диапазона;
- два одинаковых коммутатора для LAN A и LAN B.

Для преимущественно оптической станционной сети:

- **ZIRCON3856HP-8X48GX**;
- либо вариант L2 **ZIRCON2856HP** с аналогичным набором портов.

Для распределительного узла, которому нужны маршрутизация и PRP/HSR:

- **ZIRCON3828SMP-L3GTP**;
- два блока питания;
- модуль **SM3.8-PRP/HSR-1U**.

Для станционной сети средней подстанции:

- **ZIRCON3848HP / 2848HP;**
- **ZIRCON3832HP / 2832HP;**
- **ZIRCON3828HP / 2828HP** — в зависимости от требуемого числа портов.

Исполнение питания следует выбирать под оперативный ток объекта: например, варианты для 110 В постоянного тока либо для 220 В переменного/постоянного тока.

11.3 Коммутаторы для процессной шины

Наиболее полно требованиям коммутатора процессной шины соответствует:

ZIRCON3828SMP-L2GTP с модулем SM3.8-PRP/HSR-1U и двумя блоками питания.

Также могут подойти:

1. **CITRINE2500TP-TSN** — для процессной сети на основе TSN/FRER.
2. **ZIRCON2856HP, ZIRCON2837HP, ZIRCON2824HP** — для построения отдельных сетей LAN A и LAN B процессной шины PRP.
3. **ZIRCON3856HP** — для крупного централизованного узла процессной сети, если требуется высокая плотность портов и маршрутизация.

Сравнение основных моделей

Серия	Производи-тельность и задержка	Синхрониза-ция	Резервирова-ние	Multicast и QoS	Оценка для процессной шины
ZIRCON3828SMP	До 96 Mpps, задержка менее 5 мкс, 8 очередей	Аппаратный PTP, до 100 нс, Power Profile C37.238	PRP/HSR, аппаратный RedBox, FRER, MRP	GMRP, статический multicast, IGMP, QoS, Qci	Наиболее подходящий кандидат
CITRINE2500TP-TSN	До 35,76 Mpps, задержка менее 5 мкс, 8 очередей	Аппаратный IEEE 1588v2	FRER, MRP, ERPS; PRP/HSR отсутствуют	GMRP, статический multicast, до 8K групп, Qci	Хороший кандидат для TSN-сегмента
CITRINE2516FP	До 36 Гбит/с	PTP IEEE 1588v2 в режимах Master, Slave, Boundary Clock и Peer-to-Peer Transparent Clock	RSTP, MSTP, ERPS, MRP и аппаратное резервирование APS 1+1/1:1; PRP/HSR отсутствуют	VLAN, QoS, multicast-функции	Компактный L2-коммутатор доступа или уровня присоединения, особенно для шкафа с преимущественно медными подключениями.
ZIRCON2856HP	Высокая плотность портов, 10G uplink	IEEE 1588v2	MRP, ERPS, STP/RSTP/MSTP; нет PRP/HSR	VLAN, QoS, обычные multicast-функции	Подходит как коммутатор LAN A или LAN B
ZIRCON2837HP	256 Гбит/с, 133,9 Mpps, менее 5 мкс, 8 очередей	IEEE 1588v2	MRP, ERPS, STP/RSTP /MSTP	GMRP, VLAN, QoS, фильтрация потоков	Хороший оптический коммутатор PRP LAN
ZIRCON2824HP	256 Гбит/с, 190,5 Mpps, менее 5 мкс, 8 очередей	IEEE 1588v2	MRP, ERPS, STP/RSTP /MSTP	GMRP, VLAN, QoS, ACL	Подходит для небольшого узла PRP
ZIRCON3856HP	256 Гбит/с, 190,5 Mpps,	IEEE 1588v2	MRP, ERPS, STP/RSTP /MSTP	GMRP, VLAN, QoS, ACL	Централизованный коммутатор PRP LAN

Серия	Производи-тельность и задержка	Синхрониза-ция	Резервирова-ние	Multicast и QoS	Оценка для процессной шины
	менее 5 мкс, 8 очередей				

ZIRCON3828SMP

Для процессной шины наиболее предпочтительный вариант — это шасси **ZIRCON3828SMP-L2GTP**. Функции третьего уровня на процессной шине обычно не нужны, поэтому версия L2 предпочтительнее, если проектом не предусмотрена маршрутизация на этом узле.

Характеристики:

- до 24 гигабитных портов SFP/RJ45;
- четыре порта 10 Гбит/с;
- скорость пересылки до 96 млн пакетов в секунду;
- задержка коммутации менее 5 мкс;
- восемь очередей приоритетов;
- аппаратная поддержка PTP с точностью до 100 нс;
- энергетический профиль IEEE C37.238;
- статический многоадресный трафик и GMRP;
- механизмы TSN: IEEE 802.1Qbv, Qci, 802.1CB FRER, Qbu и 802.3br;
- IEC 61850-3, IEEE 1613 и IEC 61850-8-1;
- два блока питания с горячей заменой;
- электромагнитная устойчивость уровня 4.

PRP, HSR и RedBox

Модуль **SM3.8-PRP/HSR-1U** работает как встроенный RedBox. Модуль имеет аппаратную реализацию на FPGA и соответствие:

- IEC 62439-3-4 для PRP;
- IEC 62439-3-5 для HSR.

В режиме RedBox для подключения к резервированной сети могут быть назначены два порта интерфейсных модулей шасси. Таким образом, ZIRCON3828SMP способен связывать обычный Ethernet-сегмент с HSR-кольцом или PRP-сетью без отдельного внешнего RedBox.

Для процессной шины возможны следующие применения ZIRCON3828SMP:

- RedBox между HSR-кольцом присоединения и обычным Ethernet-сегментом;
- RedBox между процессной сетью HSR и станционной сетью PRP;
- коммутатор обычного сегмента, подключаемого к HSR;
- узел репликации и удаления потоков FRER в TSN-сети;
- центральный коммутатор одной из сетей процессной шины PRP.

CITRINE2500TP-TSN — для TSN-процессной сети

CITRINE2500TP-TSN рассчитан на другой архитектурный подход. Он наиболее интересен для распределённого сегмента процессной шины, построенного с применением TSN и FRER.

Характеристики:

- IEEE 802.1AS;
- передача по расписанию IEEE 802.1Qbv;
- фильтрация потоков IEEE 802.1Qci;
- репликация и удаление кадров IEEE 802.1CB FRER;
- прерывание кадров IEEE 802.1Qbu и IEEE 802.3br;
- аппаратный IEEE 1588v2;
- GMRP и статический multicast;
- восемь очередей приоритетов;
- задержка менее 5 мкс;
- до 35,76 Mpps;
- до 8K многоадресных групп;
- IEC 61850-3, IEEE 1613 и IEC 61850-8-1;
- два ввода питания.

Подходящие конфигурации

Для процессной сети целесообразно выбирать исполнения с наибольшим количеством оптических портов:

- конфигурация **12GX8GE** — 12 SFP и 8 RJ45;
- конфигурация **8GX8GE** — 8 SFP и 8 RJ45;
- конфигурация **8GX16GE** — 8 SFP и 16 RJ45;
- обязательно исполнение с двумя вводами питания.

Оптические порты предпочтительны для соединений между шкафами и открытым распределительным устройством. Медные порты можно использовать внутри одного шкафа при соблюдении требований проекта к гальванической развязке и электромагнитной обстановке.

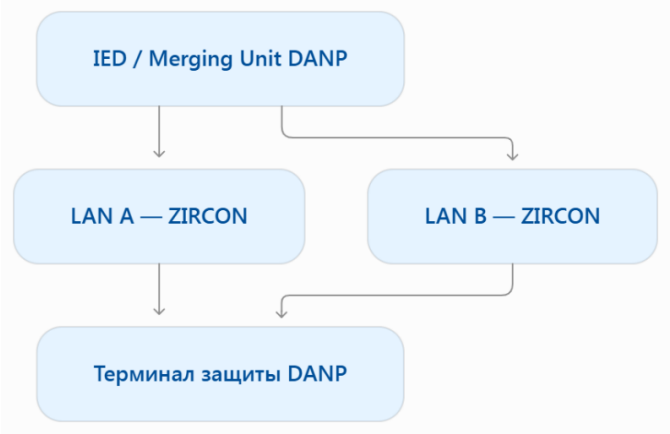
Ограничения

CITRINE2500TP-TSN нельзя считать прямой заменой HSR- или PRP-коммутатора. Он подходит для процессной шины, если проект основан на **TSN/FRER**, а резервные маршруты и конфигурация потоков сформированы внешней системой управления. Для HSR-кольца или традиционной PRP-сети он может использоваться только совместно с внешними устройствами резервирования.

Коммутаторы ZIRCON серии HP в процессной сети PRP

Обычному коммутатору внутри PRP LAN A или LAN B встроенная поддержка PRP не требуется. Репликацию кадров и удаление дубликатов выполняют конечные устройства DANP либо RedBox.

Поэтому некоторые коммуаторы ZIRCON серии HP могут использоваться в процессной шине по следующей схеме:



LAN A и LAN B должны быть физически независимы. Каждый коммутатор должен самостоятельно пропускать полный объём GOOSE, SV и PTP.

ZIRCON2856HP

Для крупной централизованной процессной сети интерес представляет оптическое исполнение:

ZIRCON2856HP-8X48GX с двумя блоками питания.

Он имеет:

- 48 гигабитных SFP;
- восемь портов 10 Гбит/с;
- IEC 61850;
- IEEE 1588v2;
- VLAN, QoS и средства управления;
- резервированное питание.

Рациональная схема — два одинаковых ZIRCON2856HP: один для LAN A, другой для LAN B.

ZIRCON2837HP

Это более компактный и практически полностью оптический вариант:

- 33 гигабитных SFP;
- четыре порта 10 Гбит/с;
- коммутационная способность 256 Гбит/с;
- скорость пересылки 133,9 Mpps;
- задержка менее 5 мкс;
- восемь очередей;
- GMRP, QoS и фильтрация потоков;
- электромагнитная устойчивость уровня 4;
- два источника питания.

Из коммутаторов линейки ZIRCON эта модель хорошо соответствует роли коммутатора отдельной процессной сети PRP. Плотность оптических портов достаточна для подключения большого количества объединяющих устройств и терминалов защиты.

ZIRCON2824HP

ZIRCON2824HP подходит для процессного сегмента с меньшим количеством устройств:

- восемь гигабитных SFP;
- восемь гигабитных RJ45;
- восемь портов 10 Гбит/с;
- 256 Гбит/с;
- 190,5 Mpps;
- задержка менее 5 мкс;
- электромагнитная устойчивость уровня 4;
- варианты с двумя источниками питания.

Модель имеет большой запас по магистральным портам, но только восемь оптических интерфейсов доступа. Поэтому она больше подходит для агрегирования нескольких процессных сегментов, чем для подключения большого количества Merging Unit.

ZIRCON3856HP

Оптическая модификация **ZIRCON3856HP-8X48GX** имеет 48 гигабитных SFP и восемь 10-гигабитных SFP+, 256 Гбит/с, 190,5 Mpps, задержка менее 5 мкс, восемь очередей, IEC 61850-3 и IEEE 1588v2.

Она может применяться как центральный коммутатор одной из сетей PRP на крупном объекте. Вместе с тем L3-функции для самой процессной шины обычно избыточны. Если маршрутизация не требуется, предпочтительнее L2-модель ZIRCON2856HP.

Итоговый выбор по архитектуре

Архитектура процессной шины	Предпочтительный коммутатор DIGICOM	Условия применения
HSR-кольцо с подключением обычных устройств	ZIRCON3828SMP-L2GTP + SM3.8-PRP/HSR-1U	Используется как аппаратный RedBox
Связь HSR и PRP	ZIRCON3828SMP + модуль PRP/HSR	
Процессная сеть PRP	Пара ZIRCON2856HP-8X48GX или ZIRCON2837HP-4X33GX	Один коммутатор в LAN A, второй в LAN B
Небольшая процессная сеть PRP	Пара ZIRCON2824HP	Достаточно восьми оптических портов доступа
Процессная сеть TSN/FRER	CITRINE2500TP-TSN	Необходима централизованная настройка потоков и независимых маршрутов

Архитектура процессной шины	Предпочтительный коммутатор DIGICOM	Условия применения
Крупный централизованный узел PRP	Пара ZIRCON3856HP-8X48GX	L3 применяется только при обоснованной необходимости
HSR без внешнего или встроенного RedBox	Остальные ZIRCON и CITRINE	Не подходят как самостоятельные узлы HSR

11.4 Коммутаторы для сервисной сети

В линейке DIGICOM есть несколько серий, подходящих для сервисной сети энергообъекта. Причём специализированные функции GOOSE, аппаратной синхронизации PTP, PRP/HSR и TSN для такой сети обычно не требуются. Поэтому наиболее рациональными часто оказываются коммутаторы с базовым промышленным функционалом, поддерживающие IEC 61850-3, MRP/RSTP/MSTP, VLAN, средства информационной безопасности и диагностики.

Под сервисной сетью понимается сеть видеонаблюдения, контроля доступа, инженерных рабочих мест, систем мониторинга, связи, диагностики и другого вспомогательного оборудования. Она должна быть отделена от станционной и процессной шин физически либо посредством контролируемых сетевых границ.

Наиболее подходящие модели

Серия DIGICOM	Предпочтительная роль	Оценка
ZIRCON3856H	Центральный коммутатор крупной сервисной сети	Один из лучших вариантов
ZIRCON3828H	Центральный или распределительный коммутатор средней сети	Один из лучших вариантов
CITRINE3814H / 3812H / 3810H / 3512H	Компактный коммутатор L3 на DIN-рейку	Полностью подходит при соответствующей ёмкости
ZIRCON2828H / ZIRCON2528H	Коммутатор L2 в стойку	Подходит для доступа и агрегации без маршрутизации
CITRINE2524H / 2520H / 2516H / 2514H	Коммутатор доступа L2 на DIN-рейку	Подходит; наличие MRP следует уточнять в заказной конфигурации
CORUND2520HP	Коммутатор PoE для камер и других сервисных устройств	Наиболее подходящий PoE-вариант
ZIRCON3828SMP-L3GTP	Универсальное ядро с PoE и расширенным резервированием	Соответствует практически всем требованиям, но обычно избыточен
ZIRCON3856HP и другие HP-серии	Совмещённая инфраструктура или унификация оборудования	Подходят, но функции PTP и MMS могут остаться невостребованными

Серия DIGICOM	Предпочтительная роль	Оценка
CITRINE2500TP-TSN	Сервисный сегмент с дополнительными требованиями по PTP/TSN	Технически подходит, но для обычной сервисной сети избыточен

ZIRCON3856H — основной кандидат для ядра сервисной сети

Для крупной сервисной сети наиболее сбалансированным вариантом выглядит **ZIRCON3856H**. Это коммутатор L3 в исполнении для 19-дюймовой стойки с 56 портами, включая восемь uplink портов SFP+ до 10 Гбит/с. Предусмотрены модификации с медными, оптическими и комбинированными портами.

Это наиболее логичный выбор, если к центральному коммутатору подключаются несколько сервисных VLAN, серверы видеонаблюдения, шлюзы, рабочие места и распределительные коммутаторы. Наличие L3 позволяет выполнять маршрутизацию между сервисными сегментами, хотя для выхода в технологические и корпоративные сети всё равно потребуется межсетевой экран.

ZIRCON3828H — вариант для сети средней ёмкости

Если 56 портов не требуется, рациональнее использовать ZIRCON3828H. Серия имеет 24 гигабитных порта доступа и четыре порта SFP+ 10 Гбит/с, поддерживает MRP и выпускается с медными либо оптическими портами. Доступны исполнения с двумя источниками питания различных номиналов.

По назначению это хороший центральный коммутатор сервисной сети небольшой или средней подстанции. Он позволяет:

- подключить серверы и автоматизированные рабочие места;
- построить оптическое кольцо между помещениями;
- разделить видеонаблюдение, контроль доступа и инженерный доступ по VLAN;
- организовать маршрутизацию между сервисными сегментами;
- выполнить резервирование линий и питания.

При выборе между ZIRCON3856H и ZIRCON3828H основными критериями будут количество портов, требуемая пропускная способность и запас на расширение.

CITRINE3814H и родственные модели — компактный вариант L3

Для распределительного шкафа или небольшой сервисной сети подходит серия **CITRINE3814H**. Коммутатор устанавливается на DIN-рейку, имеет восемь портов RJ45, два оптических порта и четыре uplink порта SFP+ 10 Гбит/с.

Он поддерживает:

- STP/RSTP/MSTP, MRP, ERPS и DG-Ring;
- VLAN, ACL и QoS;
- статическую и динамическую маршрутизацию;
- IGMP/MLD Snooping;
- 802.1X, RADIUS и TACACS+;
- SNMPv3, Syslog и RMON;
- SSH и HTTPS;

- зеркалирование портов;
- ограничение широковещательного шторма;
- два входа питания;
- диапазон рабочих температур −40…+85 °C;
- корпус имеет степень защиты IP40.

Серии **CITRINE3812H, CITRINE3810H и CITRINE3512H** выполняют аналогичную роль, но отличаются количеством и скоростью uplink портов. Все они поддерживают MRP, RSTP/MSTP, резервное питание и промышленное температурное исполнение.

Это хороший выбор для небольшого узла, где нужна маршрутизация, но установка полноразмерного стоечного коммутатора нецелесообразна.

Коммутаторы L2 без PoE

Если маршрутизация выполняется центральным коммутатором, на уровне доступа достаточно управляемого устройства L2.

Для установки в стойку подходят:

- **ZIRCON2828H** — 24 гигабитных порта доступа и четыре SFP+ 10 Гбит/с;
- **ZIRCON2528H** — 24 гигабитных порта доступа и четыре гигабитных оптических порта.

Обе серии имеют модификации с медными и оптическими интерфейсами, двумя встроенными источниками питания, поддержкой MRP и исполнением для энергетики.

ZIRCON2828H предпочтителен, если требуется агрегация нескольких высоконагруженных сервисных сегментов или передача видеотрафика. ZIRCON2528H достаточен, когда гигабитных uplink соединений хватает.

Для установки на DIN-рейку. В распределительных шкафах можно использовать:

- **CITRINE2524H**;
- **CITRINE2520H**;
- **CITRINE2516H**;
- **CITRINE2514H**.

Серия CITRINE25xxH поддерживает VLAN, ACL, 802.1X, RADIUS/TACACS+, защиту от сетевых штормов, RSTP/MSTP, ERPS, QoS, IGMP Snooping, LACP и зеркалирование портов. Предусмотрены оптические и медные конфигурации, два входа питания и температурный диапазон до −40…+85 °C.

MRP для этой серии опциональная функция. Поэтому при необходимости построения именно MRP-кольца поддержку MRP следует закрепить в заказе.

CORUND2520HP — для видеонаблюдения и других PoE-устройств

Если сервисная сеть питает камеры, точки беспроводного доступа, IP-телефоны или терминалы контроля доступа, наиболее подходящим вариантом является **CORUND2520HP**.

Коммутатор имеет:

- 16 гигабитных портов RJ45 с PoE;
- четыре оптических порта SFP;

- два входа питания 48 В постоянного тока;
- MRP, RSTP/MSTP, ERPS и DG-Ring;
- VLAN, ACL, QoS;
- 802.1X, RADIUS и TACACS+;
- IGMP Snooping;
- зеркалирование портов;
- ограничение скорости и защиту от сетевых штормов.

Устройство предназначено для установки на DIN-рейку, имеет IP40 и промышленное климатическое исполнение. Это хороший вариант полноценного управляемого PoE-коммутатора сервисного доступа.

Более компактные серии **CORUND2516HP, 2514HP, 2512HP, 2510HP и 2508HP** также можно рассматривать при меньшем количестве конечных устройств.

Специализированные IEC 61850-коммутаторы

Коммутаторы **ZIRCON3856HP, ZIRCON3848HP, ZIRCON3828HP**, а также L2-модели **ZIRCON2856HP, ZIRCON2848HP и ZIRCON2828HP** технически подходят для сервисной сети. Они имеют MRP/RSTP/MSTP, резервирование питания, промышленное исполнение и развитый сетевой функционал. Дополнительно в них реализованы PTP и сервер MMS.

Для выделенной сервисной сети эти возможности обычно не нужны. Применение HP-серий оправдано в следующих случаях:

- стремление унифицировать оборудование станционной и сервисной сетей;
- сервисный коммутатор установлен в той же электромагнитной среде;
- требуется передавать PTP через сервисный сегмент;
- система управления должна получать диагностические данные коммутатора через MMS;
- оборудование планируется в дальнейшем использовать в более ответственной роли.

Для обычной сервисной сети серия **H** с базовым функционалом выглядит экономически и архитектурно более обоснованной.

Итоговая рекомендация

Оптимальная структура для сервисной сети на оборудовании DIGICOM выглядит следующим образом:

Уровень сервисной сети	Рекомендуемые серии
Ядро крупной сети	ZIRCON3856H
Ядро средней сети	ZIRCON3828H
Компактное ядро или распределительный узел	CITRINE3814H / 3812H / 3810H
Стоечный уровень доступа L2	ZIRCON2828H / ZIRCON2528H
Уровень доступа на DIN-рейке	CITRINE2524H / 2520H / 2516H / 2514H

Уровень сервисной сети	Рекомендуемые серии
PoE-доступ	CORUND2520HP, при меньшей ёмкости — младшие модели CORUND
Универсальная модульная платформа	ZIRCON3828SMP-L3GTP

11.5 Устройства RedBox

Линейка DIGICOM включает как компактный специализированный RedBox, так и многопортовые промышленные коммутаторы со встроенной поддержкой PRP/HSR. Выбор устройства определяется количеством подключаемых узлов, требуемой плотностью портов, способом монтажа и необходимостью функций L3 и TSN.

IRID2503T — компактный специализированный RedBox

IRID2503T представляет собой управляемый коммутатор L2 с тремя комбинированными портами 100/1000 Мбит/с, каждый из которых допускает подключение по RJ45 или через SFP. Устройство поддерживает PRP и HSR по IEC 62439-3, сопряжение сетей PRP и HSR, режим QuadBox и аппаратную обработку PTP IEEE 1588v2 в режиме прозрачных часов. Функции PRP/HSR реализованы на базе FPGA. Предусмотрены варианты с одним или двумя входами питания высокого напряжения, а также исполнение с двумя входами 24–48 В постоянного тока.

IRID2503T целесообразно применять:

- для подключения отдельного устройства или небольшого обычного Ethernet-сегмента к сети PRP либо HSR;
- на границе между станционной сетью PRP и кольцом HSR;
- для организации режима QuadBox в конфигурации, предусмотренной производителем;
- в шкафу присоединения, где требуется отдельный компактный RedBox без большого количества портов доступа.

IRID3812HP-TSN, IRID3820HP-TSN и IRID3828HP-TSN — RedBox и коммутатор в одном корпусе

Серии **IRID3812HP-TSN**, **IRID3820HP-TSN** и **IRID3828HP-TSN** представляют собой промышленные коммутаторы L3 на DIN-рейку со встроенной поддержкой PRP/HSR. Они имеют четыре оптических порта SFP со скоростью до 10 Гбит/с и соответственно 8, 16 или 24 гигабитных порта RJ45. Поддерживаются PTP IEEE 1588v2, MRP, RSTP/MSTP, ERPS, VRRP и набор функций TSN, включая IEEE 802.1AS, 802.1Qbv, 802.1Qci и 802.1CB FRER.

Различия между сериями в первую очередь связаны с ёмкостью:

Серия	Порты доступа	Рекомендуемое применение
IRID3812HP-TSN	8 × RJ45	Небольшой шкаф присоединения, локальный узел процессной или станционной сети
IRID3820HP-TSN	16 × RJ45	Узел средней ёмкости, объединяющий несколько терминалов, контроллеров или обычных Ethernet-устройств

Серия	Порты доступа	Рекомендуемое применение
IRID3828HP-TSN	24 × RJ45	Крупный распределительный узел либо точка агрегации с большим количеством подключений

Эти устройства целесообразны, когда один аппарат должен одновременно выполнять функции RedBox, коммутатора доступа и узла L3. В отличие от отдельного IRID2503T, они позволяют подключать к резервированной инфраструктуре группу обычных Ethernet-устройств без установки дополнительного коммутатора.

IRID3828HP-TSN-1U — стоечный RedBox высокой ёмкости

IRID3828HP-TSN-1U функционально близок к IRID3828HP-TSN, но предназначен для установки в 19-дюймовую стойку. Он имеет 24 гигабитных порта RJ45 и четыре слота SFP со скоростью до 10 Гбит/с, поддерживает PRP/HSR, PTP, L3 и TSN.

Модель подходит для центрального помещения связи, серверной или общеподстанционного узла, где требуется высокая плотность портов и стоечное исполнение. Её можно использовать как агрегирующий RedBox станционной сети, коммутатор подключения серверов и терминалов либо центральный узел взаимодействия резервированных и обычных Ethernet-сегментов.

ZIRCON3828SMP — модульная платформа с функцией RedBox

В коммутаторах **ZIRCON3828SMP-L2GTP** и **ZIRCON3828SMP-L3GTP** функция RedBox реализуется с помощью подключаемого модуля **SM3.8-PRP/HSR-1U**. Платформа имеет четыре фиксированных порта SFP+ 10 Гбит/с и шесть слотов для интерфейсных модулей — до 24 гигабитных портов SFP, RJ45 или RJ45 с PoE. При установке модуля PRP/HSR любые два порта интерфейсных модулей можно назначить портами RedBox. Поддерживается горячая замена модуля на аналогичный.

ZIRCON3828SMP целесообразно применять:

- в центральном узле станционной или сервисной сети;
- при необходимости сочетать RedBox, L2- или L3-коммутацию, TSN и PoE;
- для смешанных медно-оптических конфигураций;
- когда состав и количество портов требуется изменять под конкретный проект;
- в качестве масштабируемой платформы агрегации с резервируемыми блоками питания.

Таким образом, **IRID2503T** ориентирован на отдельную точку преобразования PRP/HSR, серии **IRID38xxHP-TSN** — на одновременное подключение группы устройств и выполнение функций коммутатора, а **ZIRCON3828SMP** — на построение крупного модульного узла с настраиваемой портовой конфигурацией.

11.6 Серверы и преобразователи точного времени

Для построения системы синхронизации DIGICOM предлагает две серии оборудования: **QUARZ6218T** — центральный сервер точного времени со спутниковым источником, и **QUARTZ2303T** — компактный преобразователь и распределитель сигналов синхронизации. Устройства различаются местом установки и ролью в системе.

QUARZ6218T — центральный сервер точного времени. Серия принимает сигналы спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС и BeiDou, а также наземные сигналы PTP и IRIG-B. Сервер может работать в режимах PTP Grandmaster и Slave, поддерживает NTPv4, SyncE, PTP Power Profile и IEEE 802.1AS. Для передачи времени предусмотрены Ethernet-интерфейсы NTP/PTP, выходы IRIG-B, PPS, PPM, PPH и TOD через BNC, RS-232 и RS-485. Устройство выполнено в стоечном конструктиве 1U и выпускается с одним либо двумя блоками питания.

QUARZ6218T целесообразно устанавливать в центральном помещении связи или общеподстанционном пункте управления в качестве основного либо резервного источника времени. От него могут синхронизироваться серверы, коммутаторы, терминалы РЗА, объединяющие устройства, контроллеры и другие элементы станционной и процессной сети. Разнотипные выходы позволяют одновременно подключать современное оборудование с PTP и NTP и устройства предыдущих поколений с IRIG-B, TOD или импульсными входами.

QUARTZ2303T — преобразователь и локальный распределитель времени. Устройство принимает PTP, IRIG-B или 1PPS и преобразует входной сигнал в PTP, NTP/SNTP, IRIG-B, 1PPS, PPM, PPH и TOD. Предусмотрены электрические и оптические интерфейсы, включая варианты IRIG-B по многомодовому волокну на расстояние до 5 км и по одномодовому волокну — до 40 км. Преобразователь устанавливается на DIN-рейку и выпускается с питанием 110/220 В переменного или постоянного тока либо 18–72 В постоянного тока.

QUARTZ2303T подходит для установки в шкафах присоединений и удалённых распределительных пунктах, где уже имеется опорный сигнал PTP, IRIG-B или 1PPS. Типовые задачи серии:

- преобразование PTP от центрального Grandmaster в IRIG-B, 1PPS или TOD;
- подключение терминалов и контроллеров без поддержки PTP;
- передача IRIG-B по оптической линии между помещениями или удалёнными шкафами;
- распределение одного входного сигнала между несколькими устройствами;
- преобразование электрического сигнала синхронизации в оптический и обратно.

Серия	Основная роль	Типичное место установки
QUARZ6218T	Получение времени от спутниковых систем и централизованная раздача NTP, PTP, IRIG-B и импульсных сигналов	Центральное помещение связи, серверная, пункт управления подстанцией
QUARTZ2303T	Преобразование и локальное распределение уже полученного сигнала времени	Шкаф присоединения, распределительный пункт, удалённый технологический узел

Таким образом, QUARZ6218T формирует центральный уровень системы синхронизации, а QUARTZ2303T адаптирует и распределяет сигнал на уровне отдельных шкафов и групп оборудования. При выборе конкретной модификации необходимо учитывать тип входного сигнала, требуемые выходные интерфейсы, вид оптического волокна, расстояние передачи, напряжение питания и допустимое отклонение времени при потере внешнего источника.

12. Словарь терминов и сокращений

Термин или сокращение	Полная форма и русский перевод	Значение
Boundary Clock, BC	Граничные часы	Устройство PTP, которое синхронизируется через один сетевой порт и передаёт время другим сегментам через остальные порты.
BPDU	Bridge Protocol Data Unit — блок данных протокола моста	Служебные сообщения, которыми коммутаторы обмениваются при работе STP, RSTP и MSTP для построения топологии без петель.
Broadcast Domain	Широковещательный домен	Часть сети, в пределах которой распространяются широковещательные Ethernet-кадры. Границы обычно формируются маршрутизаторами или VLAN.
CNC	Centralized Network Configuration — централизованная конфигурация сети	Механизм централизованного расчёта и настройки маршрутов, расписаний и ресурсов потоков в TSN-сети.
DANH	Double Attached Node implementing HSR — узел с двойным подключением к HSR	Устройство с двумя HSR-портами, включённое непосредственно в HSR-кольцо.
DANP	Double Attached Node implementing PRP — узел с двойным подключением к PRP	Устройство, одновременно подключённое к сетям LAN A и LAN B и самостоятельно обрабатывающее дублированные PRP-кадры.
Ethernet	Ethernet — технология локальных сетей	Семейство технологий передачи кадров, определяемое стандартами IEEE 802.3 и используемое как коммуникационная основа цифровой подстанции.
Frame Preemption	Прерывание кадров	Механизм IEEE 802.1Qbu и IEEE 802.3br, позволяющий временно приостановить передачу длинного некритичного кадра для передачи срочного кадра.
FRER	Frame Replication and Elimination for Reliability — репликация кадров и удаление дубликатов для повышения надёжности	Механизм IEEE 802.1CB, создающий несколько копий выбранного потока и удаляющий повторные кадры в точке восстановления.
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Event — обобщённое объектно-ориентированное событие подстанции	Быстрые многоадресные сообщения IEC 61850 для передачи команд защит, блокировок, положений аппаратов и других событий.

Термин или сокращение	Полная форма и русский перевод	Значение
gPTP	generalized Precision Time Protocol — обобщённый протокол точного времени	Профиль PTP по IEEE 802.1AS, применяемый для синхронизации устройств в TSN-домене.
Grandmaster Clock	Ведущие часы	Основной источник времени в домене PTP или gPTP. Обычно связан с глобальной навигационной спутниковой системой или другим эталонным источником.
HSR	High-availability Seamless Redundancy — бесшовное резервирование с высокой готовностью	Протокол IEC 62439-3, передающий две копии кадра в противоположных направлениях кольца.
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure — защищённый протокол передачи гипертекста	Защищённый вариант HTTP, применяемый для доступа к веб-интерфейсу управления коммутатором.
IEC	International Electrotechnical Commission — Международная электротехническая комиссия, МЭК	Международная организация, разрабатывающая стандарты в области электротехники, энергетики, электроники и автоматизации.
IEC 61850 / МЭК 61850	Communication Networks and Systems for Power Utility Automation — сети и системы связи для автоматизации электроэнергетических объектов	Серия стандартов, определяющая модели данных, коммуникационные сервисы и принципы обмена информацией на электростанциях и подстанциях.
IEC 61850-3	General Requirements — общие требования	Часть IEC 61850, устанавливающая требования к конструкции, электромагнитной совместимости, питанию, безопасности и стойкости оборудования к внешним воздействиям.
IEC 61850-8-1	Specific Communication Service Mapping — отображение специальных коммуникационных сервисов	Определяет передачу сервисов IEC 61850 с использованием MMS и Ethernet-кадров, включая GOOSE.
IEC 61850-9-2	Sampled Values over ISO/IEC 8802-3 — выборочные значения через Ethernet	Определяет передачу потоков оцифрованных значений токов и напряжений по Ethernet.
IEC TR 61850-90-4	Network Engineering Guidelines — рекомендации по проектированию сетей	Технический отчёт с рекомендациями по построению локальных сетей подстанций на основе IEC 61850.

Термин или сокращение	Полная форма и русский перевод	Значение
IEC TR 61850-90-13	Deterministic Networking Technologies — технологии детерминированных сетей	Технический отчёт о применении TSN и других детерминированных технологий в автоматизации электроэнергетических объектов.
IEC 62439-2	Media Redundancy Protocol — протокол резервирования среды передачи	Стандарт, определяющий работу MRP в промышленных кольцевых Ethernet-сетях.
IEC 62439-3	PRP and HSR	Стандарт, определяющий протоколы бесшовного резервирования PRP и HSR.
IEC/IEEE 60802	Time-Sensitive Networking Profile for Industrial Automation — профиль TSN для промышленной автоматизации	Определяет набор функций, параметров и процедур TSN для промышленных сетей.
IEC/IEEE 61850-9-3	Precision Time Protocol Profile for Power Utility Automation — профиль PTP для автоматизации электроэнергетики	Устанавливает правила применения PTP в сетях электростанций и подстанций.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers — Институт инженеров электротехники и электроники	Международная профессиональная организация, разрабатывающая стандарты Ethernet, PTP, TSN и других технологий.
IEEE 1588	Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems — протокол точной синхронизации часов	Базовый стандарт PTP, на основе которого созданы энергетический профиль IEC/IEEE 61850-9-3 и gPTP.
IEEE 802.1AS	Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications — синхронизация для чувствительных ко времени приложений	Определяет gPTP и общую шкалу времени для TSN.
IEEE 802.1CB	Frame Replication and Elimination for Reliability	Определяет идентификацию потоков, репликацию кадров, обнаружение копий и удаление дубликатов.
IEEE 802.1p	Traffic Class Expediting and Dynamic Multicast Filtering	Механизм приоритизации Ethernet-трафика. Значение приоритета передаётся в теге VLAN IEEE 802.1Q.

Термин или сокращение	Полная форма и русский перевод	Значение
IEEE 802.1Q	Bridges and Bridged Networks — мосты и объединённые локальные сети	Основной стандарт VLAN, коммутации Ethernet, классов трафика и ряда протоколов управления топологией.
IEEE 802.1Qbu	Frame Preemption — прерывание кадров	Определяет управление прерыванием низкоприоритетных Ethernet-кадров. Работает совместно с IEEE 802.3br.
IEEE 802.1Qbv	Enhancements for Scheduled Traffic — расширения для передачи по расписанию	Определяет управление выходными очередями коммутатора по синхронизированному временному расписанию.
IEEE 802.1Qcc	Enhancements to Stream Reservation Protocol — расширения настройки чувствительных ко времени потоков	Описывает модели централизованной и распределённой настройки потоков и сетевых ресурсов TSN.
IEEE 802.1Qci	Per-Stream Filtering and Policing — фильтрация и контроль отдельных потоков	Позволяет контролировать скорость, размер кадров и временные характеристики каждого потока.
IEEE 802.1Qcr	Asynchronous Traffic Shaping — асинхронное формирование трафика	Механизм управления задержкой потоков без единого циклического расписания передачи.
IEEE 802.1X	Port-Based Network Access Control — управление доступом на уровне порта	Механизм аутентификации устройств и пользователей перед предоставлением доступа к сети.
IEEE 802.3	Ethernet	Семейство стандартов физического и канального уровней проводного Ethernet.
IEEE 802.3br	Interspersing Express Traffic — вставка срочного трафика	Определяет работу прерывания кадров на уровне управления доступом к среде.
IED	Intelligent Electronic Device — интеллектуальное электронное устройство	Микропроцессорное устройство автоматизации, защиты, управления или измерения на энергетическом объекте.
IGMP Snooping	Internet Group Management Protocol Snooping — отслеживание групп IGMP	Функция коммутатора для управления многоадресным IP-трафиком. К GOOSE и SV канального уровня непосредственно не применяется.
IP	Internet Protocol — межсетевой протокол	Протокол сетевого уровня, используемый для адресации и маршрутизации пакетов.

Термин или сокращение	Полная форма и русский перевод	Значение
LAN	Local Area Network — локальная вычислительная сеть	Сеть в пределах ограниченного объекта. В PRP используются две независимые сети, обозначаемые LAN A и LAN B.
Layer 2, L2	Канальный уровень	Уровень Ethernet-кадров и MAC-адресов. GOOSE и SV обычно передаются непосредственно на этом уровне.
MAC	Media Access Control — управление доступом к среде	Канальный механизм Ethernet. MAC-адрес служит аппаратным адресом сетевого интерфейса или многоадресной группы.
Merging Unit, MU	Объединяющее устройство	Устройство, преобразующее измерительные сигналы токов и напряжений в цифровые потоки Sampled Values.
MMS	Manufacturing Message Specification — спецификация производственных сообщений	Клиент-серверный протокол для передачи измерений, состояний, команд, отчётов, журналов и файлов.
MRC	Media Redundancy Client — клиент резервирования среды	Участник MRP-кольца, контролируемый менеджером резервирования.
MRM	Media Redundancy Manager — менеджер резервирования среды	Управляющий узел MRP-кольца, контролирующий его целостность и состояние резервного порта.
MRP	Media Redundancy Protocol — протокол резервирования среды передачи	Протокол IEC 62439-2 для восстановления связи после единичного отказа в кольцевой Ethernet-топологии.
MSTP	Multiple Spanning Tree Protocol — протокол множественных связующих деревьев	Расширение RSTP, позволяющее использовать несколько деревьев для разных групп VLAN.
Multicast	Многоадресная рассылка	Передача одного кадра или пакета группе получателей. Используется в GOOSE, SV и ряде служебных протоколов.
Non-blocking Switching Fabric	Неблокирующая коммутационная матрица	Архитектура коммутатора, рассчитанная на одновременную передачу данных между портами без ограничения со стороны внутренней матрицы.
NTP	Network Time Protocol — сетевой протокол времени	Протокол синхронизации часов по IP-сети. Обычно применяется там, где не требуется точность PTP.

Термин или сокращение	Полная форма и русский перевод	Значение
Per-Stream Filtering and Policing, PSFP	Фильтрация и контроль отдельных потоков	Функция IEEE 802.1Qci для проверки и ограничения каждого сконфигурированного потока.
PoE	Power over Ethernet — питание по Ethernet	Передача электропитания и данных по одному медному Ethernet-кабелю. Может применяться в сервисных сетях.
Process Bus	Процессная шина	Сеть между измерительными устройствами, терминалами защиты, контроллерами выключателей и другим оборудованием уровня процесса.
PRP	Parallel Redundancy Protocol — протокол параллельного резервирования	Протокол IEC 62439-3, при котором две копии кадра одновременно передаются через независимые сети LAN A и LAN B.
PTP	Precision Time Protocol — протокол точного времени	Протокол IEEE 1588 для точной синхронизации часов сетевых устройств.
PTP Power Profile	Precision Time Protocol Profile for Power Utility Automation — энергетический профиль PTP	Распространённое название профиля IEC/IEEE 61850-9-3 для электроэнергетики.
QoS	Quality of Service — качество обслуживания	Набор механизмов классификации, приоритизации и управления очередями сетевого трафика.
QuadBox	Четырёхпортовый блок резервирования	Устройство с двумя парами HSR-портов, предназначенное для соединения HSR-колец.
RedBox	Redundancy Box — блок резервирования	Устройство, подключающее обычный Ethernet-узел или сегмент к сети PRP или HSR.
RSTP	Rapid Spanning Tree Protocol — протокол быстрого связующего дерева	Протокол резервирования Ethernet-топологии с блокировкой избыточных путей и их активацией после отказа.
SAN	Single Attached Node — узел с одиночным подключением	Обычное устройство с одним подключением, не выполняющее функции PRP или HSR.
SNMP / SNMPv3	Simple Network Management Protocol — простой протокол сетевого управления	Используется для мониторинга и управления сетевым оборудованием. SNMPv3 поддерживает аутентификацию и защиту передаваемых данных.

Термин или сокращение	Полная форма и русский перевод	Значение
SSH	Secure Shell — защищённая командная оболочка	Протокол защищённого удалённого доступа к командному интерфейсу коммутатора.
Station Bus	Станционная шина	Сеть между серверами, автоматизированными рабочими местами, шлюзами, контроллерами и терминалами присоединений.
STP	Spanning Tree Protocol — протокол связующего дерева	Базовый протокол построения Ethernet-топологии без петель. В современных сетях обычно применяется его более быстрый вариант RSTP.
SV	Sampled Values — выборочные значения	Потоки оцифрованных отсчётов токов и напряжений, передаваемые согласно IEC 61850-9-2.
SyncE	Synchronous Ethernet — синхронный Ethernet	Технология передачи опорной частоты через физический уровень Ethernet. Не передаёт календарное время и фазу.
Syslog	Системный журнал	Протокол передачи сообщений о событиях, ошибках и изменениях состояния оборудования на централизованный сервер.
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol — протокол управления передачей / межсетевой протокол	Базовый стек IP-сетей. В IEC 61850 используется, в частности, для передачи MMS.
Time-Aware Shaper, TAS	Формирователь трафика с учётом времени	Механизм IEEE 802.1Qbv, открывающий и закрывающий очереди коммутатора по временному расписанию.
Transparent Clock, TC	Прозрачные часы	Режим PTP, при котором коммутатор измеряет время нахождения сообщения внутри устройства и добавляет соответствующую поправку.
TSN	Time-Sensitive Networking — сети с учётом времени, или сети, чувствительные ко времени	Семейство стандартов IEEE 802.1 для детерминированной передачи данных по Ethernet.
VLAN	Virtual Local Area Network — виртуальная локальная сеть	Логически изолированный сегмент Ethernet, создаваемый внутри общей физической инфраструктуры.

Термин или сокращение	Полная форма и русский перевод	Значение
Wire-speed	Производительность на скорости линии	Способность обрабатывать трафик на полной номинальной скорости портов без снижения пропускной способности.

Термин	Значение
Автоматизированное рабочее место	Компьютер оператора, диспетчера или инженера с программами контроля, управления, настройки и диагностики оборудования подстанции.
Оперативный ток	Система электропитания цепей управления, автоматики, сигнализации и релейной защиты. На подстанциях часто используется постоянный оперативный ток.
Подстанционный коммутатор	Промышленный Ethernet-коммутатор, рассчитанный на условия эксплуатации и сетевые задачи электрической подстанции.
Присоединение	Часть электрической подстанции, относящаяся к определённой линии, трансформатору, секции шин или другому элементу энергосистемы.
Промышленный Ethernet-коммутатор	Коммутатор в защищённом исполнении, рассчитанный на повышенные требования к температуре, электромагнитной совместимости, питанию, механической стойкости и сроку эксплуатации.
Противоаварийная автоматика	Комплекс автоматических устройств и алгоритмов, ограничивающих развитие аварийных процессов в энергосистеме.
Релейная защита	Комплекс устройств, выявляющих повреждения и ненормальные режимы электрооборудования и формирующих команды на отключение или сигнализацию.
Сервисная сеть	Сетевой сегмент для инженерного доступа, диагностики, настройки, видеонаблюдения и других вспомогательных задач.
Терминал защиты	Микропроцессорное устройство, выполняющее функции релейной защиты, автоматики, регистрации и управления.
Цифровая подстанция	Подстанция, в которой измерения, состояния, команды и служебные данные передаются между интеллектуальными устройствами преимущественно в цифровой форме.

Техническая поддержка

Если вы столкнулись с проблемой при первичной настройке или при эксплуатации, свяжитесь с нашим сервисным центром.

Головной офис, Москва

Телефоны: +7 (495) 723-81-21, +7 (499) 969-81-21

E-mail: sales@dgsys.ru

Техническая поддержка 24/7

E-Mail: support@dgsys.ru

Телефон: +7 (495) 723-33-33

Адрес офиса обслуживания и склада:

117535, г. Москва, Варшавское шоссе, дом 133, строение 2, помещение 301А