

Сергей Воробьёв

TSN – синхронизируемые по времени сети

Часть 1

В статье приведён обзор новой технологии TSN, которая позволит обеспечить прогнозируемый уровень задержки передачи информации для Ethernet-сетей.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная сеть Ethernet всё чаще и чаще находит применение в самых сложных и разносторонних задачах, примером могут служить как проекты, связанные с многоуровневым подходом IIoT, так и, например, концепция цифровой подстанции. Задачи разные, но в обоих случаях используется Ethernet как единая среда для передачи данных, при этом задачи описывают условия, в которых различные виды оборудования постоянно взаимодействуют друг с другом для того, чтобы поддерживать эффективность и безопасность процесса. Нередки случаи, когда накладываются достаточно жёсткие требования по времени передачи критически важных данных. При этом уже сейчас во многих промышленных задачах требуемый временной интервал, отводимый на цикл передачи чувствительных ко времени данных от отправителя к адресату, должен быть менее 1 мс. В связи с этим сейчас можно встретить подход, при котором для данных, которые чувствительны ко времени, строится отдельная сеть или канал передачи. Это связано с тем, что на данном этапе развития Ethernet-технологии у неё есть один существенный недостаток, который не позволяет перейти на качественно новый уровень. Этот недостаток связан с отсутствием стандартизованного механизма установки минимальных уровней задержки при передаче данных, а также их прогнозирования. Сейчас на

рынке представлены такие технологии передачи данных, как EtherCAT, PROFINET IRT, SERCOS III, которые обеспечивают низкое время цикла гарантированной передачи данных, их ещё называют Ethernet реального времени (Real-Time Ethernet). Они основаны на обычной технологии Ethernet, но включают дополнительные механизмы и надстройки для обеспечения низкого уровня задержек. Механизмы при этом несовместимы друг с другом. Используя стандартное оборудование, не получится совместно применять EtherCAT и PROFINET IRT, поэтому подобные протоколы используются для решения различных локальных задач. Но если оценивать перспективу, то можно сказать, что локальные задачи будут перерастать в более объёмные и даже глобальные, при этом поток данных будет постоянно увеличиваться. В связи с этим специалистами института инженеров электротехники и электроники (ИИЭЭ) совместно с ведущими производителями промышленного коммуникационного оборудования начата работа по созданию новой технологии TSN (Time-Sensitive Networking – синхронизируемые по времени сети), которая позволит обеспечить уже существующим Ethernet-сетям, базирующимся на стандартах IEEE 802.1 и IEEE 802.3, минимальный и прогнозируемый уровень задержки пакета данных.

Фактически это означает, что в ближайшем будущем Ethernet-сеть сможет

обеспечить прогнозируемый уровень задержки фрейма и отклонения от расчётных величин, низкий уровень потери пакетов, а также возможность установки гарантированной полосы пропускания.

Сейчас сложно себе представить, что при помощи технологий TSN в долгосрочной перспективе классическая пирамида АСУ ТП перестанет существовать и преобразуется в дерево (рис. 1), где между магистральным и полевым уровнями будет организован единый высокоскоростной канал передачи данных.

Интеллектуальными датчиками на полевым уровне будет управлять группа виртуальных ПЛК, а по общему каналу данных будет передаваться самая разная информация, начиная от команд управления и заканчивая потоком видеоданных. При этом требования по времени к циклу передачи критически важных данных будут выполняться.

Даже сегодня можно предвидеть, что сети TSN достигнут очень широкой аудитории, а целевые рынки, скорее всего, будут самыми различными. TSN-сети позволят объединять многочисленные небольшие сети в единую сетевую структуру, которая сможет глобально работать в режиме реального времени, обеспечивая при этом большую полосу пропускания для данных.

Можно обозначить следующие преимущества сетей TSN с учётом специфики сфер применения.

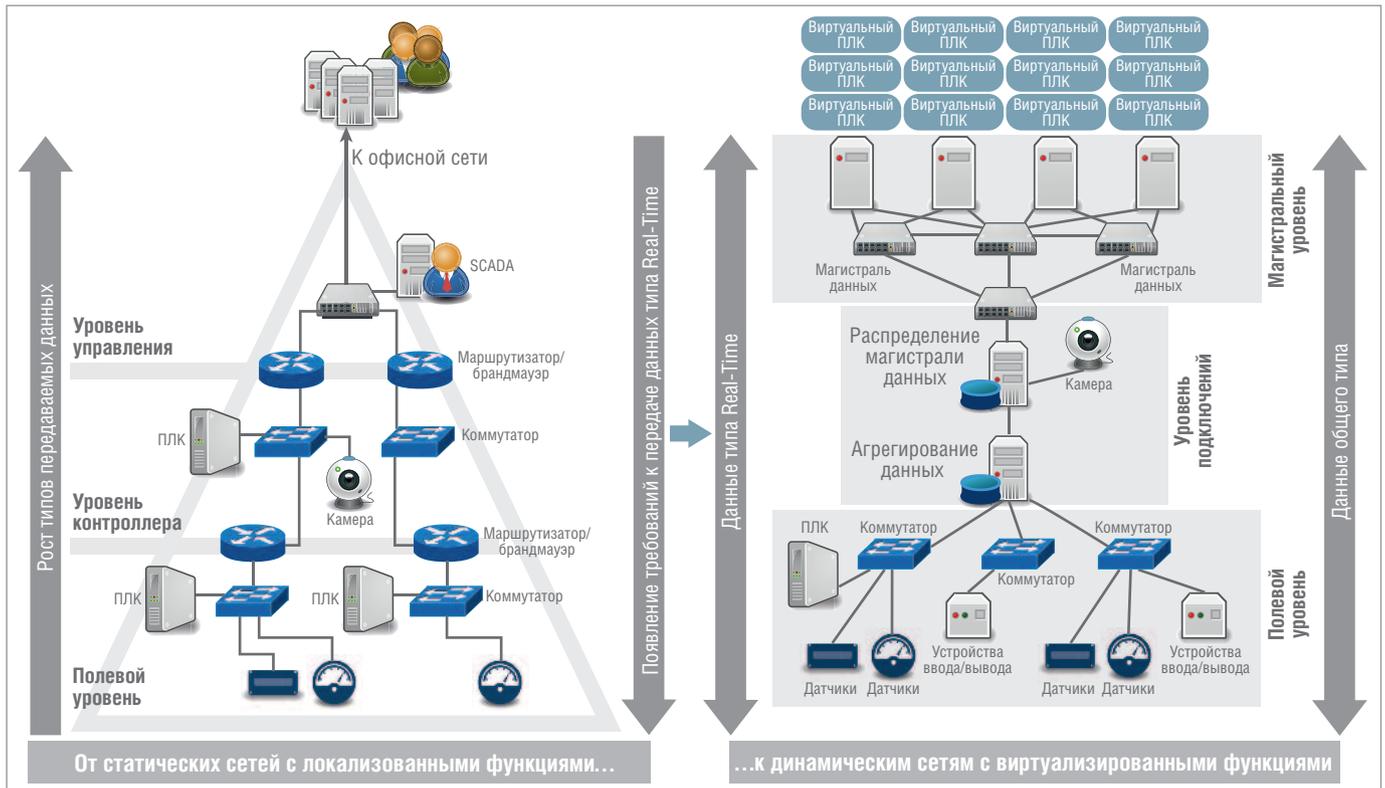


Рис. 1. Трансформация промышленной сети от пирамиды к столбу автоматизации

Автоматизация производства

В автоматизации производства создание единой TSN-сети обеспечит распределённое управление процессами в реальном времени. Различные виды высокоточного оборудования могут взаимодействовать друг с другом более чётко и продуктивно. При этом остальные менее критичные ко времени процессы не будут оказывать влияния на текущее состояние дел. Например, если ранее для выполнения профилактических работ, которые связаны с анализом и передачей значительных объёмов данных с датчиков и устройств, приходилось останавливать производство, то теперь при использовании механизмов TSN подобные операции не будут приводить к изменению в текущих процессах и остановке производства.

Автоматизация энергосистем

В данной сфере, особенно при автоматизации систем на подстанциях, TSN-сети могут успешно использоваться для обеспечения передачи критичных ко времени данных, таких как, например, SV-поток, GOOSE-сообщения, с которыми работает оборудование РЗА. Даже сейчас сетевое оборудование для подстанций, как правило, имеет отраслевую сертификацию IEC 61850-3, которая накладывает жёсткие требования на приоритезацию передачи критической информации. И если на данном этапе коммутаторы, сертифицирован-

ные по IEC 61850-3, как правило, справляются со своей задачей, то при внезапном увеличении потока данных могут появиться неконтролируемые задержки при передаче данных. Механизмы TSN позволят нивелировать данную особенность.

Автоматизация транспортной инфраструктуры

Для данной сферы применение механизмов TSN позволит создать единый поток передаваемых данных с чётким выделением критически важной информации. Например, в рамках подвижного состава возможно создание единой сети, где функции обеспечения безопасности пассажиров могут быть объединены с задачами управления или даже системами развлечений пассажиров, не оказывая при этом влияния друг на друга. Критически важные данные будут передаваться точно и в срок.

TSN-СТАНДАРТЫ: МЕХАНИЗМЫ И ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ

Как было отмечено ранее, для создания технологий и механизмов TSN были задействованы различные участники, так как стандарт TSN не состоит из единого документа, а представляет собой семейство стандартов, которые в настоящее время создаются и дорабатываются. Разработка началась ещё в 2012 году, и к настоящему времени основные

механизмы функционирования TSN уже доступны в качестве стандартов.

Фактически основные механизмы TSN включают следующие разделы.

Синхронизация времени гарантирует, что все устройства в сети синхронизированы по времени.

Планирование в режиме реального времени обеспечивает своевременную доставку критически важных данных.

Резервирование и конфигурация канала передачи данных осуществляют контроль пути передачи данных и уровня надёжности соединения.

Стандарты TSN как единый механизм сейчас находятся в стадии разработки: все ключевые стандарты завершены, но некоторые ещё разрабатываются. В табл. 1 представлено состояние каждого TSN-стандарта, при этом не исключено, что будут добавлены новые стандарты. Надо учесть, что устройство, обозначенное как TSN-совместимое (TSN-ready), не обязательно поддерживает все стандарты TSN. При выборе оборудования рекомендуется уточнять данный момент, так как ряд стандартов зависят друг от друга. Например, планировщик передачи трафика в режиме реального времени (TAS, Time-Aware Scheduler), далее TAS-планировщик, описанный в стандарте IEEE 802.1Qbv-2015, является ключевым элементом, который фактически реализует функциональность 802.1Qbu-2016 и 802.3br-2016.

Статус стандартов TSN

Функция	Стандарт IEEE	Краткое описание	Статус
Синхронизация времени	P802.1AS	Синхронизация точного времени для чувствительных ко времени задач и приложений	Разработка
	1588-2008 (PTP)	Протокол синхронизации точного времени	Закончен
Планирование в режиме реального времени	802.1Qbv-2015	Усовершенствования процесса пересылки трафика, который поддерживает передачу запланированного трафика	Закончен
	802.1Qch-2017	Циклическая организация очередей фреймов и их пересылка	Закончен
	P802.1Qcr	Асинхронное планирование трафика	Разработка
	802.1Qbu-2016	Усовершенствования процесса пересылки фреймов, вытеснение фреймов	Закончен
	802.3br-2016	Дробление и вставка фреймов в свободные промежутки времени для пересылки	Закончен
Резервирование и конфигурация канала передачи данных	P802.1Qcc	Улучшения механизмов резервирования потока данных	Разработка
	802.1Qci-2017	Фильтрация и контроль для каждого потока	Закончен
	802.1Qca-2015	Контроль пути передачи и резервирование	Закончен
	802.1CB-2017	Копирование и удаление фреймов	Закончен

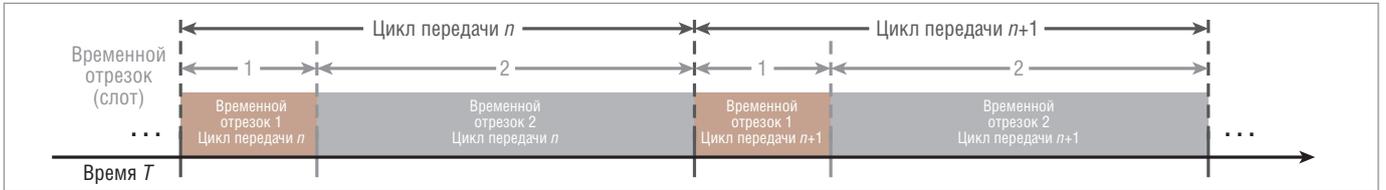


Рис. 2. Мультиплексирование с временным разделением позволяет резервировать временные интервалы в цикле для своевременной передачи критически важных данных в реальном времени

РАССТАНОВКА ПРИОРИТЕТОВ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ TAS-ПЛАНИРОВЩИКА

Фактически до начала разработки технологий TSN наиболее популярный механизм задания приоритизации трафика был описан стандартом IEEE 802.1Q – это всем известный CoS (Class of Service): 7 – высокий уровень, 0 – низкий. Коммутатор обращается к специальной метке и принимает решение о разделении трафика. Однако из-за принципа работы и эффектов очередей Ethernet-фрейм с низким приоритетом, который уже находится на стадии передачи, может задерживать Ethernet-фреймы даже с самым высоким приоритетом (7). И этот эффект может наблюдаться на каждом из коммутаторов на пути передачи.

В TSN используется иной принцип, который основан на времени и его точной установке на всех устройствах, за процессом следит TAS-планировщик, который обеспечивает приоритизацию передачи Ethernet-фреймов на основе времени передачи. Это очень важный механизм, осуществляющий координацию и обмен данными в сети.

Фактически TAS помогает убрать узкие места при передаче критически важных данных, а также сводит к минимуму эффект организации очереди при передаче фреймов внутри Ethernet-коммутатора.

Основная идея этого механизма TSN описана в стандарте IEEE 802.1Qbv-2016. Суть состоит в том, чтобы исполь-

зовать временное разделение на циклы передачи. Время передачи делится на отдельные сегменты одинаковой длины, так называемые циклы, как показано на рис. 2. Это позволяет выделять временные интервалы для передачи критически важных фреймов в пределах циклов передач. Например, TAS может прервать передачу обычного трафика, чтобы переслать данные, чувствительные ко времени передачи, в пределах зарезервированных временных интервалов для трафика высокого приоритета.

Таким образом, TAS позволяет устанавливать приоритеты для данных в реальном времени (см. временной интервал 1 на рис. 2) по отношению к обычному трафику данных.

Подобно схеме расстановки приоритетов TAS использует приоритеты QoS

(Quality of Service – качество обслуживания), которые присутствуют в теге VLAN заголовка Ethernet. В этом случае все Ethernet-фреймы обрабатываются до тех пор, пока они не создадут очереди в выходном порте. Именно в этот момент TAS-планировщик вмешивается в обработку пакетов, как показано на рис. 3.

Точнее, с использованием TAS выбор следующего Ethernet-фрейма для передачи данных больше не определяется строго линейной иерархией в очереди, а обусловлен состоянием соответствующего временного отрезка для передачи. Данное состояние может быть открытым или закрытым в зависимости от фактического времени. Ethernet-фреймы, ожидающие передачи в связанных очередях, будут учитываться при выборе фрейма в зависимости от этих со-

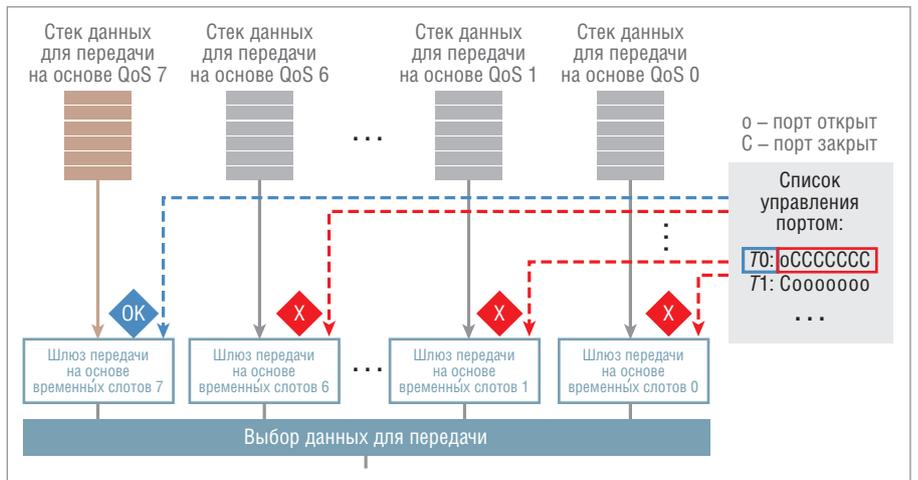


Рис. 3. Работа планировщика передачи трафика в режиме реального времени

стояний. Например, на рис. 3 в конкретный момент времени обрабатывается только очередь с приоритетом 7.

Управление временными отрезками для передачи данных задаётся списком управления портом, в нём указано, какую очередь трафика разрешено передавать в определённый момент времени в цикле. Помимо состояний порта список управления также содержит продолжительность времени, в течение которого передача будет активной. В случае списка управления, показанного справа на рис. 3, этот список отражает цикл, который состоит из временного слота для обычного трафика, а также слота с приоритетным трафиком данных с рис. 2.

Необходимость защитных полос и прерывание Ethernet-фреймов

Из-за очень плохой предсказуемости шаблонов передачи трафика, как правило, нельзя предвидеть, когда нужно будет обрабатывать конкретный пакет данных. Например, как показано на рис. 4, передача Ethernet-фрейма во временном интервале 2 может быть начата слишком поздно. Затем этот фрейм, если не учитывать использование TAS-планировщика, перейдёт во временной интервал 1 последующего цикла. Следовательно, это приведёт к задержке обработки данных в реальном времени и нарушению гарантированных задержек при передаче.

Чтобы избежать таких ситуаций, помимо барьеров передачи между временными интервалами введены требования к так называемым защитным полосам вместе с TAS, учитывающим время. Эти за-

щитные полосы останавливают передачу пакетов на время обработки фрейма максимального размера. Таким образом, защитные полосы могут предотвращать передачу фреймов, которые могли бы проникнуть в последующий временной интервал. Как показано на рис. 4, это предотвращает задержки при обработке данных в реальном времени во время перехода от фазы к фазе с высокоприоритетным трафиком. Но такая защитная полоса неизбежно приводит к нежелательным потерям времени, когда сеть вообще не может использоваться, и, следовательно, к потере пропускной способности.

В дополнение к защитным полосам TAS-планировщик также позволяет учитывать длину пакета следующего фрейма. Решение о том, передавать его сейчас или ожидать следующего временного интервала, зависит от того, достаточно ли короткий фрейм для полной передачи в текущем временном интервале. Но даже с этим механизмом могут возникать ситуации, когда в текущем временном интервале просто не хватает времени или фрейм, который нужно передать, слишком велик для передачи. Следовательно, даже с этим механизмом нельзя полностью предотвратить время простоя, возникающее в результате создания защитных полос.

Чтобы увеличить до максимума полезную полосу пропускания для обычного трафика, были разработаны стандарты IEEE 802.1Qbu и IEEE 802.3br. С их помощью обычные Ethernet-фреймы могут разделяться на небольшие пакеты (framelets) размером до 64 байтов, и каждый framelet может передаваться отдель-

но. Как показано на рис. 5, это позволяет начать передачу большого фрейма, несмотря на недостаточное время, оставшееся в данном временном слоте. Фрейм может быть прерван на последней 64-байтовой границе до того, как закончится текущий временной слот, и затем может быть завершён на следующем этапе.

Благодаря данному механизму вместо запрета на отправку фрейма коммутатор будет отправлять часть фрейма, блокируя только ту его часть, которая не помещается во временном интервале в текущем цикле. Оставшаяся часть фрейма затем переходит к следующему циклу. Например, в случае сети Fast Ethernet время простоя от каждой защитной полосы может быть уменьшено до 0,12 мс и таким образом может быть достигнуто значительное улучшение использования доступной полосы пропускания.

В связи с тем, что данный механизм (Frame Preemption) является существенным вмешательством в обычный процесс пересылки и обработки трафика, необходимо, чтобы оба устройства соединения (например, два коммутатора Ethernet) поддерживали этот механизм и сигнализировали об этом посредством использования протокола LLDP (IEEE 802.1AB).

Синхронные циклы передачи данных как обязательное условие работы

Ключевой компонент TSN-сети, TAS-планировщик, использует для работы локальные данные конфигурации, которые доступны в конкретном сете-

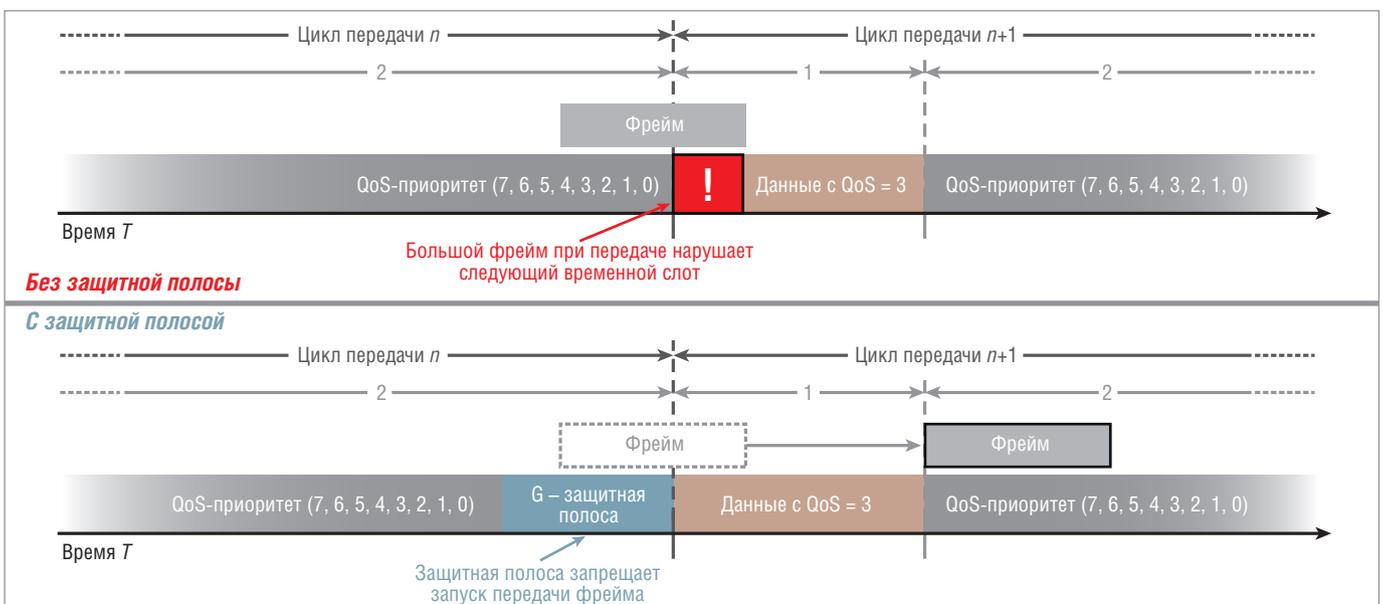


Рис. 4. Защитная полоса предотвращает распространение фреймов во временной интервал, зарезервированный для данных в реальном времени, но уменьшает доступную полосу пропускания

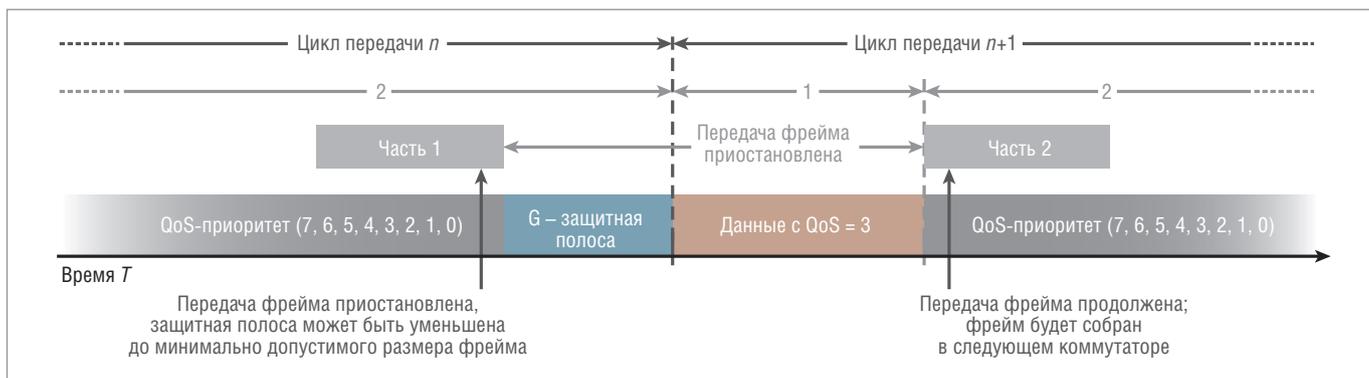


Рис. 5. С помощью метода вытеснения Ethernet-фрейма размер защитной полосы может быть уменьшен от максимального размера Ethernet-фрейма до минимально допустимого

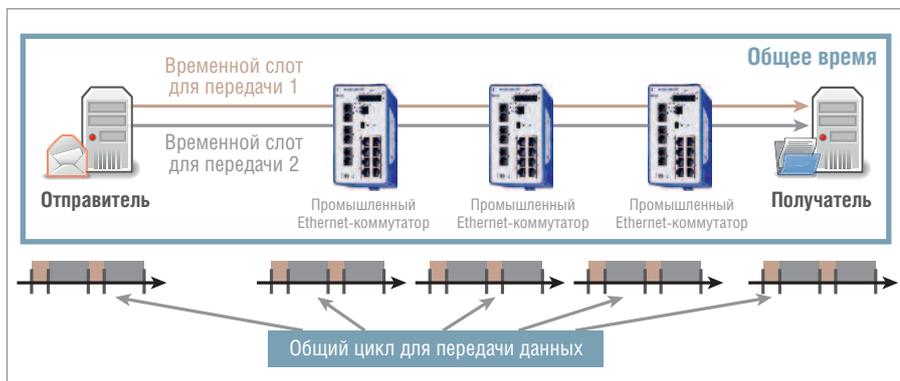


Рис. 6. Точная синхронизация времени является обязательным условием для работы планировщика передачи трафика в режиме реального времени

вом устройстве. Эти данные конфигурации состоят из информации о длине циклов и временных слотов. И логично было бы предположить, что они должны быть одинаковыми на всех устройствах в сети.

Следовательно, для работы TAS требуется очень точная синхронизация между устройствами в сети, чтобы гарантировать, что фреймы соответствуют правильным временным интервалам при передаче и приёме. Это необходимое условие, чтобы организовать передачу потоков данных с гарантированными задержками и даже без задержек, которые могут быть в очередях (рис. 6). Но это означает, что все участники сети должны иметь общее представление о времени. В частности, все устройства должны обладать информацией о том, когда цикл передачи начинается, а также о временном слоте, который в данный момент активен в цикле. Для того чтобы всё функционировало, необходимо использование протокола для синхронизации времени.

Сейчас наибольшую точность может обеспечить стандарт IEEE 1588 либо 802.1AS, классифицируется как профиль IEEE 1588-2008, известный как PTP (Precision Time Protocol – протокол точного времени).

Стандарты IEEE 1588 и IEEE 802.1AS обеспечивают синхронизацию в пределах сети с точностью менее 1 мкс. В отличие от протоколов, известных в ИТ-средах, таких как сетевой протокол времени (NTP), для IEEE 1588 не обязательно использовать глобальную синхронизацию. Чаще всего участник сети с наиболее точными «часами» определяется с помощью алгоритма BMC (Best Master Clock – алгоритм определения наилучших часов). Это устройство затем служит в качестве опорных часов (Grandmaster Clock), с которыми синхронизируются все остальные участники сети. Для TSN-сетей очень важно, чтобы время было синхронизировано со всеми часами в сети, по аналогии с синхроимпульсами, а время суток играет лишь второстепенную роль. Профиль IEEE 802.1AS следует той же модели синхронизации. Первоначально он был разработан с целью определения только тех параметров, которые актуальны в локальных сетях. В результате процесса стандартизации TSN профиль IEEE 802.1AS был расширен за счёт добавления параметров из IEEE 1588, которые требуются для использования в сетях автоматизации.

Также IEEE 1588 предлагает поддержку нескольких временных доменов, которые могут быть синхронизированы

параллельно. Соответственно, с IEEE 1588 участники сети могут быть синхронизированы с глобальной привязкой времени (как с NTP), а также с локальной привязкой времени сети. Это даёт возможность использовать глобальную синхронизацию для однозначной регистрации событий, в то время как локальную синхронизацию можно использовать для планировщика, поскольку в данном случае синхронизация в соответствии с глобальными особенностями (например високосная секунда) не требуется. Помимо прочего указанная возможность также будет включена в следующую версию этого профиля с IEEE 802.1AS (Rev 9).

Поскольку текущая версия IEEE 1588 была определена в 2008 году, данный стандарт для синхронизации времени уже был внедрён. В некоторых случаях были даже созданы специализированные профили для различных применений, при этом нет необходимости специально использовать IEEE 802.1AS для синхронизации времени, поскольку механизмы TSN позволяют использовать любой произвольный механизм для синхронизации времени. Таким образом, в зависимости от области применения вместо IEEE 802.1AS может использоваться IEEE 1588 с определённым профилем или без него. IEEE 802 в перспективе не будет ограничивать свободу выбора протокола для синхронизации времени. В любом случае, независимо от используемого протокола синхронизации, качество тактовой синхронизации должно быть очень высоким, чтобы все устройства в сети запускали и заканчивали циклы и временные интервалы в правильные моменты времени. ●

**Автор – сотрудник
фирмы ПРОСОФТ
Телефон: (495) 234-0636
E-mail: info@prosoft.ru**

КОРПУСА, СИСТЕМЫ И ШКАФЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

ОТКРЫТЫЕ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

- Шкафы Varistar LHX с водяным охлаждением
- Системы MicroTCA
- Системы CompactPCI/Serial
- Корпуса Interscale для одноплатных систем

