

TSN – СЕТИ ETHERNET, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КО ВРЕМЕНИ

Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: arosl@mail.ru

Для построения большинства коммутируемых сетей с пакетной передачей данных используется технология второго уровня Ethernet на основе серии стандартов IEEE 802. Она имеет много преимуществ – высокую пропускную способность, простоту, масштабируемость, совместимость оборудования и др. Однако в сетях Ethernet отсутствует предсказуемость в доставке данных, что ограничивает их применение в системах реального времени, особенно для промышленных приложений. Институтом IEEE разработана специальная модификация технологии Ethernet – чувствительные ко времени сети TSN (Time-Sensitive Networking). Технология TSN базируется на стандартах IEEE 802.1 и IEEE 802.3 и поэтому полностью совместима с классической технологией Ethernet, но в то же время обеспечивает минимальный и прогнозируемый уровень задержки пакетов данных, а также надежность доставки информации. В последние годы технология TSN начинает активно внедряться в различные сети (бортовые и промышленные сети, промышленный Интернет вещей IIoT, сегмент fronthaul в сетях 5G и др.). В статье представлены базовые принципы технологии TSN Ethernet, приведен перечень стандартов, разработанных целевой группой TSN, а также проектов новых стандартов. Показаны отличительные особенности кадра TSN Ethernet, описаны базовые технологии, принципы построения и работы чувствительных ко времени сетей, приведены сведения об испытательных стендах для тестирования сетевого оборудования.

Ключевые слова: технология Ethernet, чувствительные ко времени сети TSN, стандарты IEEE 802.1, синхронизация сети, формирователь с учетом времени, формирователь на основе кредита

Введение

В последние годы бурное развитие инфокоммуникаций (сети промышленной автоматизации Индустрии 4.0, киберфизические системы, беспилотный транспорт, сложные бортовые сети, Интернет вещей IIoT, тактильный Интернет и др.) привело к созданию и активному использованию на практике разнообразных систем реального масштаба времени (РМВ). Такие системы реагируют на внешние события, обрабатывают входные данные и обеспечивают вывод данных в определенный временной интервал в соответствии с заданными временными ограничениями.

Правильность результата работы системы РМВ зависит не только от правильности преобразования входной информации в выходную, но и от соблюдения интервала времени отклика. Поэтому такие системы должны быть реактивными и корректными по времени, их поведение должно быть предсказуемым. Следовательно, сквозная задержка в системе РМВ должна быть небольшой и детерминированной, наихудшее время отклика должно быть ограничено, в случае конфликтов должно быть передано сообщение с наивысшим приоритетом, должна быть высокая надежность доставки информации.

В настоящее время для построения большинства локальных и региональных коммутируемых сетей с пакетной передачей данных используется технология второго уровня Ethernet, которой

посвящена группа стандартов IEEE 802. Она имеет много преимуществ – высокую пропускную способность, простота, масштабируемость, совместимость и др. Но, с другой стороны, в сетях Ethernet отсутствует предсказуемость в доставке данных, что ограничивает их применение в системах РМВ, особенно для промышленных приложений. Поэтому для промышленных сетей автоматизации были разработаны различные модификации технологии Ethernet, такие как EtherCAT, EtherNet/IP, Ethernet POWERLINK и др. Все указанные решения используют коммутируемую сеть Ethernet для представления полнодуплексной связи, которая обеспечивает режим реального времени, поэтому их еще называют Ethernet реального времени (Real-Time Ethernet) [1].

Однако основной их недостаток – они не могут обеспечить строго детерминированную по времени доставку изохронного трафика, несовместимы между собой и не позволяют строить масштабируемые универсальные сети. Поэтому институтом IEEE была разработана специальная модификация технологии Ethernet – чувствительные ко времени сети TSN (Time-Sensitive Networking) [2]. Технология TSN базируется на стандартах IEEE 802.1 и IEEE 802.3 и поэтому полностью совместима с классической технологией Ethernet, но в то же время обеспечивает минимальный и прогнозируемый уровень задержки пакетов данных. Таким образом, использование

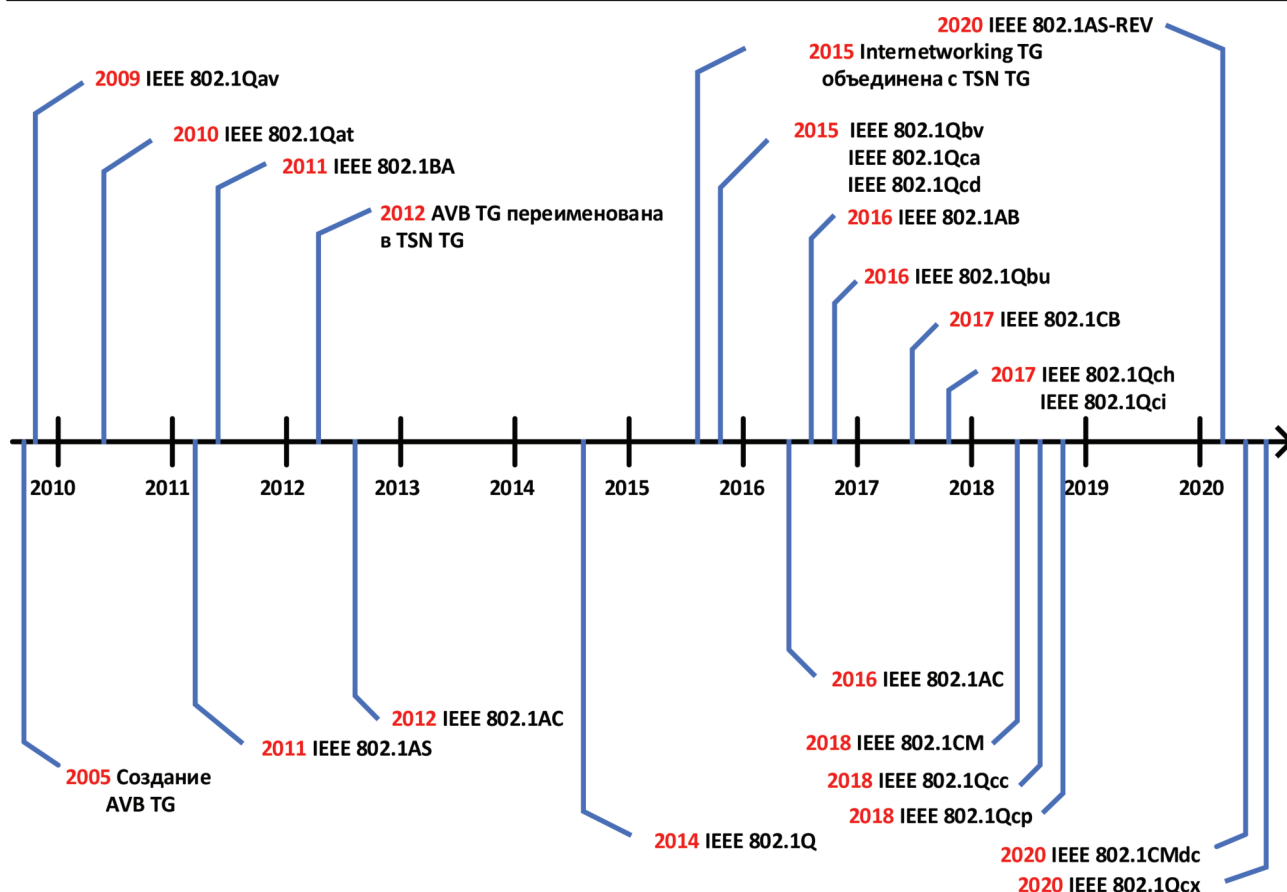


Рисунок 1. Хронология стандартизации технологий AVB и TSN

в сетях Ethernet технологии TSN позволяет создавать мультисервисные сети, совмещающие недетерминированную информационную инфраструктуру с детерминированной операционной инфраструктурой, например отвечающей за управление промышленным оборудованием и функциональную безопасность.

В последние годы технология TSN начинает активно внедряться не только в промышленные сети, например сети промышленного Интернета вещей PoT [3], но и в традиционные сети связи, например для реализации переднего транспортного сегмента fronthaul в сетях 5G [4]. Однако информация по сетям TSN практически не освещена и не обобщена на страницах отечественных изданий. Учитывая это, в статье представлен обзор стандартов, технологий и принципов построения чувствительных ко времени сетей TSN.

Базовые принципы сетей TSN Ethernet

Технологии TSN дополняют существующие возможности классического Ethernet средствами обеспечения качества обслуживания QoS, включая выделение необходимой полосы пропускания, строгую синхронизацию по времени, гарантию низких значений задержки и даже резервирование путей передачи данных.

Оконечные устройства, подключаемые к сети TSN, извещают сеть о требуемом качестве сквозных коммуникаций, и сеть гарантированно реализует для них необходимый уровень QoS. Такие подключения представляют собой потоки данных реального времени, для которых резервируется полоса пропускания (временное окно в кадре Ethernet) сетевых коммутаторов на всем пути передачи данных между оконечными устройствами. Разные потоки инкапсулируются в один кадр Ethernet с различными правилами обслуживания, и в результате TSN позволяет запускать в одной сети несколько потоков разных протоколов, поддерживающих передачу данных в режиме реального времени. В этом и заключается принципиальное отличие данной технологии от существующих сейчас протоколов реального времени на основе технологии Ethernet, работающих в сети только изолированно.

В основе технологии TSN лежат следующие базовые принципы [5].

1. Синхронизация времени – все устройства в сети синхронизированы от общего эталонного источника времени.

2. Фиксированная низкая задержка – сети TSN обеспечивают гарантированную и своевре-

Таблица 1. Классификация принятых стандартов IEEE TSN

Область технологии TSN	Идентификатор IEEE	Название
Временная синхронизация	802.1AS-2020	Точное время и синхронизация для приложений, чувствительных к задержкам
	802.1CMde-2020	Усовершенствования профилей Fronthaul для поддержки нового интерфейса Fronthaul, стандартов синхронизации и синтонизации
Надежность передачи данных в сети	802.1CB-2017	Копирование и удаление кадров для надежности
	802.1Qcx-2020	Модель данных YANG для управления повреждениями соединений
	802.1Qat-2010	Протокол резервирования потока SRP
	802.1Qca-2015	Управление путями и резервирование
Планирование и формирование трафика	802.1Qbu-2016	Прерывание кадра
	802.1Qbv-2015	Улучшения планирования трафика
	802.1Qch-2017	Циклическая очередь и пересылка
	802.1Qci-2017	Фильтрация и политики для отдельных потоков
	802.1Qcr-2020	Профилирование асинхронного трафика
	802.1Qav-2009	Пересылка и ожидание в очереди для чувствительных ко времени потоков FQTSS
Конфигурирование и управление сетью	802.1Qcc-2018	Улучшения протокола резервирования потока SRP и повышение производительности
	802.1Qcp-2018	Модель данных YANG
Профили TSN	802.1BA-2011	Профиль для сетей Audio Video Bridging (AVB)
	802.1CM-2018	Профиль TSN для переднего сегмента (Fronthaul) транспортной сети

менную доставку чувствительного к задержкам трафика за счет специальных механизмов приоритетного планирования передачи данных и прерывания передачи низкоприоритетных кадров.

3. Надежность доставки информации – копии пакетов отправляются одновременно по нескольким путям в сети TSN, чтобы избежать потери данных, вызванных отказом оборудования.

4. Управление сетевыми ресурсами – используются централизованное или распределенное планирование и конфигурирование маршрутов передачи данных в сети.

Реализация этих базовых принципов TSN в соответствующих стандартах IEEE рассмотрена далее.

Стандарты TSN Ethernet

В 2005 году в рамках рабочей группы IEEE 802.1 была создана целевая группа AVB (Audio Video Bridging) для разработки стандартов, позволяющих передавать несжатое потоковую аудио- и видеoinформацию профессионального качества через стандартные сети Ethernet без потерь. Отличительной особенностью технологии AVB от стандартного Ethernet являются синхронизация по времени и низкая задержка. В период 2005–2012 гг. целевая группа AVB разработала ряд стандартов (см. рисунок 1) [6].

Цель этих стандартов состояла в том, чтобы позволить пользователю создавать специальные самонастраиваемые (plug-and-play) сети, гарантирующие строго ограниченную задержку и низ-

кий джиттер. При разработке стандартов было замечено, что возможности AVB могут быть полезны и в промышленных сетях. Однако такая технология недостаточно надежна, поэтому было решено сформировать вместо группы AVB новую группу, которая исправит данную проблему и добавит дополнительные функции. Эта новая группа получила название целевая группа сетевых технологий, чувствительных ко времени TSN TG [2].

Разработка технологии TSN началась в 2012 г. и к настоящему времени основные механизмы функционирования таких сетей уже доступны в качестве стандартов. Большинство стандартов, разработанных целевой группой TSN, основываются на стандартах IEEE 802.1 и IEEE 802.3 и являются расширениями виртуальных локальных сетей IEEE 802.1Q (VLAN). Классификация опубликованных стандартов для TSN приведена в таблице 1 [2].

Проекты новых стандартов и поправок в существующие (они имеют букву «Р» в обозначении) приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Следует отметить, что целевая группа TSN TG кроме отдельных стандартов разрабатывает также так называемые профили, которые определяют функции, параметры, протоколы и процедуры построения сетей TSN для конкретного применения, что упрощает их взаимодействие и развертывание. Так, уже разработаны профили для сетей AVB (IEEE 802.1BA) и переднего сегмента (Fronthaul) транспортной сети 5G (IEEE

Таблица 2. Проекты новых стандартов IEEE TSN

Идентификатор IEEE	Название
IEC/IEEE 60802	Профиль TSN для промышленной автоматизации
P802.1CS	Протокол регистрации локального канала
P802.1CQ	Назначение вещательных и локальных адресов
P802.1DC	Качество предоставления услуг сетевыми системами
P802.1DF	Профиль TSN для сетей провайдеров услуг
P802.1DG	Профиль TSN для автомобильных бортовых сетей Ethernet

Таблица 3. Проекты поправок в существующие стандарты IEEE TSN

Идентификатор IEEE	Название
P802f	Модель данных YANG для любых типов
P8 02.1Qcj	Автоматическое подключение к услугам провайдера магистрального моста (PBB)
P802.1Qcw	Модель данных YANG для планирования трафика, прерывания кадров, фильтрации и применения политик к потоку
P802.1Qcz	Изоляция перегрузки
P802.1Qdd	Протокол распределения ресурсов
P802.1Qdj	Улучшения конфигурирования для TSN
P802.1ABcu	Модель данных LLDP YANG
P802.1ABdh	Поддержка многокадровых протокольных блоков данных
P802.1ASdm	Горячий резерв
P802.1ASdn	Модель данных YANG
P802.1CBcv	Модель данных FRER YANG и модуль базы данных управляющей информации
P802.1CBdb	Расширенные функции идентификации потока FRER

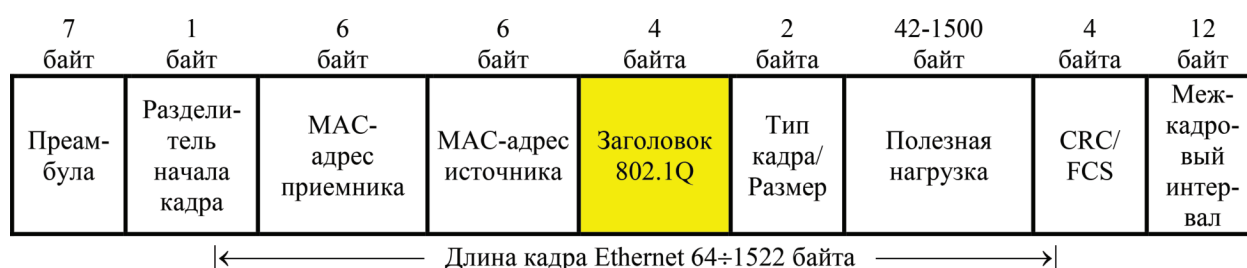


Рисунок 2. Кадр Ethernet с заголовком 802.1Q

802.1CM-2018) (см. таблицу 1). Планируется создание профилей TSN для промышленной автоматизации (IEC/IEEE 60802), бортовой сети Ethernet в автомобиле (P802.1DG) и сетей поставщиков услуг (P802.1DF) (таблица 2).

Отличительные особенности кадра TSN Ethernet

Для реализации приоритизации и прерывания кадров стандарт 802.1Q добавил четырехбайтовое поле заголовка 802.1Q между полем MAC-адрес источника и полем Тип кадра (размер исходного кадра Ethernet, см. на рисунке 2) [7].

Два байта заголовка 802.1Q используются для идентификатора метки протокола TPID (Tag Protocol Identifier), а два других байта – для информации управления метками TCI (Tag Control Information) (см. рисунок 3). TPID используется для идентификации кадра как кадра с меткой IEEE 802.1Q и устанавливается в постоянное значение (0x8100).

TCI состоит из трех подполей:

- значение кода приоритета PCP (Priority Code Point) – трехбитное поле, определяющее уровень приоритета кадра;

- индикатор допустимости удаления кадра DEI (Drop Eligible Indicator) – однобитовое поле, может использоваться отдельно или совместно с PCP для указания кадров, которые могут быть отброшены при наличии перегрузки;

- идентификатор виртуальной LBC VID (VLAN Identifier) – двенадцатибитное поле, указывающее VLAN, к которой принадлежит кадр.

Поскольку PCP – это трехбитное поле, можно определить до восьми различных классов трафика в сетях TSN. В стандарте IEEE 802.1Q не определено, как должен обрабатываться трафик после присвоения ему определенного уровня приоритета, но есть рекомендации IEEE, которые приведены в таблице 4 [8].



Рисунок 3. Формат заголовка 802.1Q

Таблица 4. Присвоение уровней приоритетов различным типам трафика TSN по рекомендации IEEE

PCP	Приоритет	Обозначение	Тип трафика
0	0 (низший)	BK	Фоновый (Background)
1	1 (по умолчанию)	BE	Передаваемый с лучшими усилиями (Best Effort)
2	2	EE	Передаваемый с наивысшими усилиями (Excellent Effort)
3	3	CA	Критические приложения (Critical Applications)
4	4	VI	Видео (задержка и джиттер <100 мс) (Video)
5	5	VO	Голос (задержка и джиттер <10 мс) (Voice)
6	6	IC	Межсетевое управление (Internetwork Control)
7	7 (высший)	NC	Сетевое управление (Network Control)

Таблица 5. Распределение классов трафика TSN по очередям

		Число доступных очередей							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Приоритет	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	1	2	2	2
	3	0	0	0	1	1	2	3	3
	4	0	1	1	2	2	3	4	4
	5	0	1	1	2	2	3	4	5
	6	0	1	2	3	3	4	5	6
	7	0	1	2	3	4	5	6	7

Таким образом, максимально возможно реализовать 8 очередей, при этом каждому классу трафика будет соответствовать своя очередь. В случае реализации менее восьми очередей каждая очередь может использоваться разными типами классов трафика. Существует определенный способ сопоставления класса трафика на основе его приоритета с доступными очередями, который приведен в таблице 5. Например, если используются только две очереди, то очередь 0 доступна классам трафика 0–3, а очередь 1 – классам 4–7.

Базовые технологии TSN Ethernet

Синхронизация сети (IEEE 802.1AS). Синхронизация времени в сети TSN осуществляется путем распределения синхросигналов из централизованного источника времени по всей сети с использованием модели «ведущий – ведомый» (см. рисунок 4). Синхронизация основана на протоколе точного времени IEEE 1588, который использует кадры Ethernet для передачи информации, необходимой для синхронизации.

Стандарт IEEE 802.1AS – это подмножество IEEE 1588, которое использует протоколы и ме-

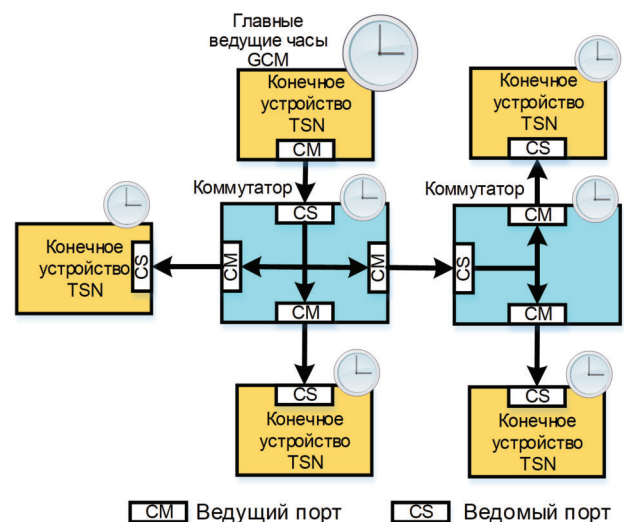


Рисунок 4. Схема «ведущий – ведомый» для временной синхронизации в IEEE 802.1AS

ханизмы, необходимые для сетей промышленной автоматизации и бортовых сетей автомобилей, и обеспечивает точность синхронизации до микросекунд. Для распределения информации о времени от главного ведущего источника ко всем конечным точкам используется обобщенный протокол точного времени gPTP (Generalized Precision Time Protocol). Последняя версия стандарта IEEE802.1AS-REV обеспечивает повышенную точность измерения времени и поддержку нескольких временных областей для резервирования [2].

Все локальные ведомые часы должны быть синхронизированы с главными ведущими часами GCM (Grand Clock Master). Синхронизация передается от GCM и его главного порта синхронизации CM (Clock Master) к нижестоящим ведомым портам синхронизации CS (Clock Slave) в коммутаторах. Каждый коммутатор корректирует за-

держку и передает информацию о синхронизации на все нисходящие ведомые порты CS, в конечном итоге достигая конечных точек. В процессе синхронизации каждый коммутатор выполняет синхронизацию собственных локальных часов, вычисляя задержку в канале связи и время поступления кадра.

Время поступления кадра – это время, необходимое для постановки его в очередь, обработки и передачи от ведущего порта к ведомым портам в каждом коммутаторе. Задержка в канале – это задержка распространения сигнала между двумя соседними коммутаторами. Точность временной синхронизации в основном зависит от точности измерений времени поступления и времени задержки в канале связи. Стандарт IEEE 802.1AS использует соотношение между частотами локального (ведомого) и главного ведущего GMS генераторов тактовых импульсов для вычисления синхронизированного времени, а также соотношение между частотами ведомого CS и ведущего CM генераторов смежных сетевых узлов (коммутаторов и конечных точек) для расчета задержки передачи.

Формирователь с учетом времени TAS (IEEE 802.1Qbv). Ключевой технологией TSN, обеспечивающей строгую гарантию задержки трафика в сетевых элементах, является формирователь с учетом времени TAS (Time Aware Shaper), который приведен в стандарте IEEE 802.1Qbv. Формирователь TAS предназначен для разделения обмена данными в сети Ethernet в повторяющиеся временные циклы фиксированной длины. В пределах этих циклов выделяются различные временные интервалы, которым назначаются один или несколько из восьми приоритетов PCP.

Это обеспечивает исключительное право использования среды передачи Ethernet для тех классов трафика, которые требуют строгих гарантий передачи и не могут быть прерваны. Фактически используется схема множественного доступа к каналу с временным разделением TDMA (Time Division Multiple Access), при которой организованные виртуальные каналы связи в течение фиксированных интервалов времени отделяют критичный ко времени трафик от фоновой и позволяют избежать буферизации и недетерминированного прерывания критического трафика. Формирователь TAS используется для передачи трафика данных управления CDT (Control Data Traffic) с наивысшим приоритетом с задержкой в наихудшем случае 100 мкс на каждом из пяти переходов и максимальным периодом передачи 0,5 мс [9].

Планирование передачи трафика осуществляется с использованием специального временного расписания – списка управления шлюзами GCL (Gate Control List) – см. рисунок 5. С каждой очередью выходного порта коммутатора TSN связан соответствующий шлюз передачи, который может находиться в одном из двух состояний: открыт или закрыт. Передача кадров Ethernet из соответствующей очереди допускается, когда шлюз находится в открытом состоянии. Если шлюз закрыт, то передачи кадров нет. Если два или более шлюзов открыты одновременно, передается кадр с более высоким приоритетом, в то время как трафик с более низким приоритетом задерживается. Реализация расписания GCL обычно синхронизируется с использованием единых часов в сети TSN на основе стандарта IEEE 802.1AS, чтобы гарантировать работу сети в реальном времени и соблюдение строгой временной синхронизации.

Коммутатор может иметь до восьми очередей для различных типов сетевого трафика. Каждый кадр TSN Ethernet имеет трехбитную метку PCP, в соответствии с которой кадр блоком выбора очередей QSU (Queue Selection Unit) пересылается в соответствующую очередь передачи, где он буферизуется. В каждой очереди алгоритм выбора передачи TSA (Transmission Selection Algorithm) определяет, какие данные брать из очереди. Алгоритм TSA может реализовать простую дисциплину «первый пришел – первым ушел» (FIFO), формирователь на основе кредита CBS (Credit-Based Shaper), описанный далее, или любой фирменный специфический алгоритм. Данные могут быть переданы в селектор передачи TS (Transmission Selection) только в том случае, если шлюз соответствующей очереди открыт. Расписание работы каждого шлюза определяет список GCL, который состоит из битовых векторов, указывающих открытое (1) или закрытое (0) состояние шлюза. Для каждого битового вектора в GCL указана длительность времени его реализации.

На рисунке 5 показан пример, где в интервале времени T4 открыты только шлюзы очереди 7 и 6, а остальные шлюзы закрыты. Расписание открытия шлюзов для каждого входа должно быть выполнено за один цикл. Список GCL является циклическим, определяется соответствующим приложением и обычно составляется вручную. Селектор передачи TS выбирает кадр с наивысшим приоритетом для передачи в выходной порт коммутатора TSN.

Эффективная скорость передачи данных из очереди N через коммутатор TSN с временным планировщиком TAS за один цикл работы шлюза определяется выражением:

$$R_g = R_N \frac{T_v}{T_o},$$

где R_N – скорость передачи данных выходного порта через открытый шлюз N ; T_v – общее время передачи данных из очереди N в цикле работы шлюза; T_o – общее время, в течение которого шлюз очереди N открыт в цикле работы шлюза.

В коммутаторах Ethernet, которые не поддерживают планирование с учетом времени TAS, шлюз всегда открыт, и общее время открытого состояния шлюза очереди N соответствует времени цикла работы шлюза $R_g = R_N$.

При использовании формирователя TAS возможна ситуация, когда начинается передача мешающего кадра непосредственно перед началом зарезервированного периода времени и передача планируемого трафика выйдет за пределы отведенного временного окна. Поэтому перед началом очередного окна устанавливается защитная полоса, равная по размеру максимально возможному мешающему кадру.

Формирователь на основе кредита CBS (IEEE 802.1Qav). Стандарт IEEE 802.1Qav – один из первых, разработанных целевой группой AVB. Основная его цель – формирование трафика для AV-медиапоток (аудио и видео). Критичные сообщения, управляемые формирователем TAS, требуют низкой сквозной задержки и должны передаваться как можно быстрее. С другой стороны, потоковая передача трафика мультимедиа не имеет таких ограничений. Гораздо важнее обеспечить непрерывный поток аудио-, видеокадров и более равномерную передачу данных. Для таких потоков был разработан формирователь TSA на основе кредита CBS (Credit Base Shaper), который сглаживает трафик и равномерно распределяет кадры во времени.

Очередь, у которой есть формирователь CBS, в каждый момент времени имеет определенную величину кредита. Величина кредита увеличивается с настраиваемой скоростью $idleSlope$, когда кадры ждут передачи в очереди или когда нет сообщений и кредит отрицательный. Кредит уменьшается с настраиваемой скоростью $sendSlope$ во время передачи кадра или последовательности кадров (в зависимости от того, сколько кредита было накоплено ранее). Передача кадра из очереди возможна только в том случае, если ее кредит неотрицателен. Если в очереди нет сообщений и кредит положительный, он сбрасывается в ноль.

Величина скорости возрастания кредита $idleSlope$ формирователя CBS определяется долей полосы пропускания ΔB выходного порта коммутатора, выделяемая данному классу трафика [2]

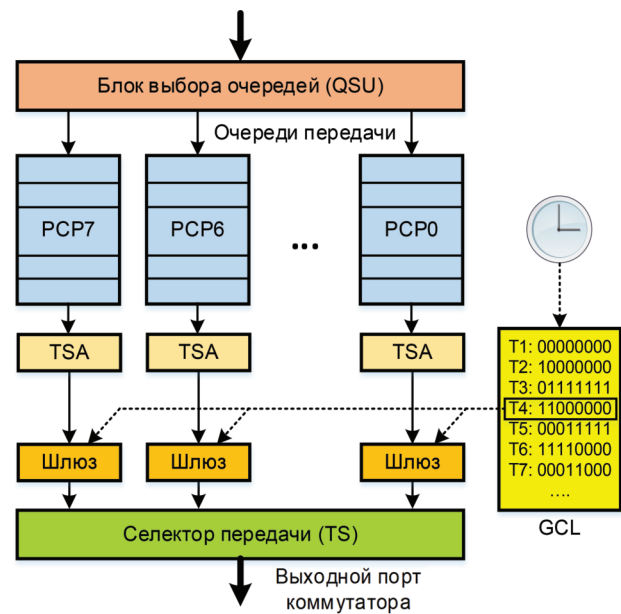


Рисунок 5. Функциональная схема коммутатора TSN с формирователем TAS

$$idleSlope = R_N \times \Delta B.$$

Величина скорости убывания кредита $sendSlope$ всегда отрицательная и определяется из уравнения:

$$sendSlope = idleSlope - R_N.$$

Для формирователя на основе кредита 802.1Qav выделяют два класса резервирования: класс А (приоритет 5) с требованием задержки в наихудшем случае 2 мс и максимальным периодом передачи 125 мкс и класс В (приоритет 4) с задержкой в наихудшем случае 50 мс и максимальным периодом передачи 250 мкс [9]. Эти классы трафика не должны превышать предустановленную максимальную долю занимаемой полосы пропускания (75 % для аудио- и видео-приложений). Максимальное количество сетевых переходов – 7. Хотя сообщения трафика классов А и В имеют более высокий приоритет по сравнению с трафиком BE, в соответствии с правилами формирователя CBS они могут ожидать в очереди, пока количество кредитов не станет неотрицательным. Это защищает трафик BE за счет ограничения максимального количества последовательно передаваемых сообщений AV-трафика.

На рисунке 6 показан пример совместной работы формирователя с учетом времени TAS и формирователей на основе кредита CBS. Имеется четыре различных класса трафика: планируемый критичный трафик данных управления CDT (Control Data Traffic), медиатрафик классов А и В и фоновый трафик BE. При обслуживании сообщения BE S_1 кредиты очередей А и В возрастают со скоростями $idleSlope_A$ и $idleSlope_B$ соответственно.

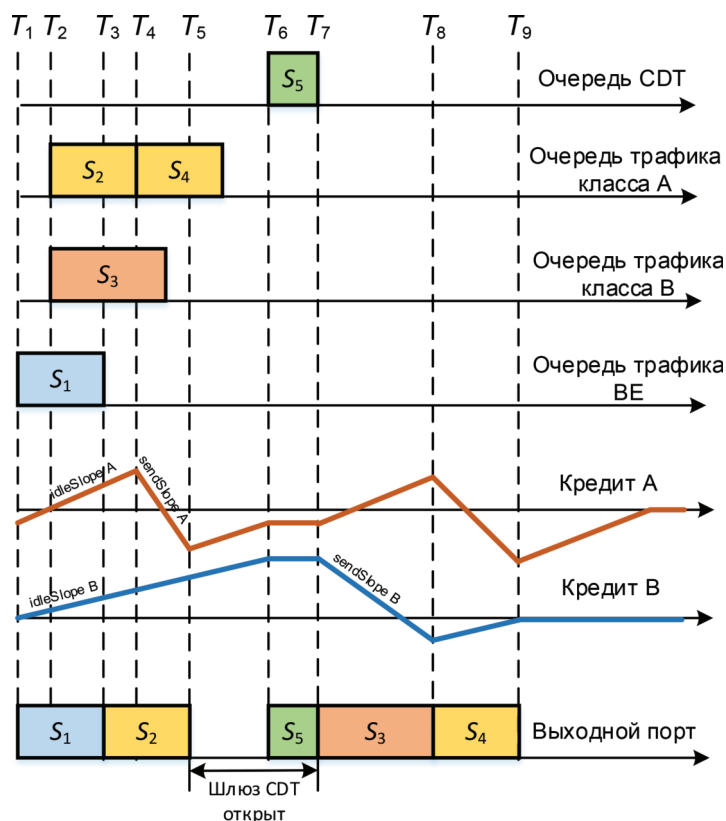


Рисунок 6. Пример работы формирователей на основе кредита

В момент времени T_3 после окончания обслуживания сообщения BE начинается обслуживание сообщения класса A S_2 , т. к. оно имеет более высокий приоритет, чем сообщение класса B S_3 . Кредит очереди A начинает уменьшаться со скоростью $sendSlope A$, а кредит B продолжает увеличиваться. Сообщение S_5 передает критичные данные CDT, и известно, что оно может поступить в течение временного интервала от T_5 до T_7 . Поэтому в течение этого времени в расписании GCL формирователя TAS запланировано открытие шлюза очереди CDT, а шлюзы других очередей закрыты. Во время передачи сообщения S_5 кредиты A и B не изменяются. В момент времени T_7 в соответствии с приоритетами должно передаваться сообщение S_4 , однако кредит A отрицательный, поэтому передается сообщение S_3 , имеющее более низкий приоритет, но положительный кредит.

При передаче сообщения S_3 кредит B уменьшается со скоростью $sendSlope B$. Из этого примера видно, что управление шлюзами с помощью планировщика TAS обеспечивает строгую гарантию задержки передачи критичных сообщений, а формирователи CBS реализуют справедливое обслуживание трафика разных приоритетов и производят его сглаживание.

Прерывание кадров (IEEE 802.1Qbv). Известны два основных способа организации при-

оритетной очереди: без прерывания и с прерыванием обслуживания ранее поступивших заявок. Обычный коммутируемый Ethernet использует приоритетную очередь без прерывания, когда критичный ко времени кадр не обрабатывается сразу после его прибытия, если обрабатывается не критичный ко времени кадр. Он помещается в начало очереди и обрабатывается как можно быстрее после передачи не критичного кадра. Таким образом, критичный кадр будет получать задержку в зависимости от объема не критичного трафика. Для того чтобы уменьшить задержку, поправка IEEE 802.1Qbv вводит очередь с прерыванием. Она минимизирует задержку для критичных кадров, но также обеспечивает защиту для не критичных кадров, чтобы минимизировать влияние на него. Если критичный кадр получен во время обработки не критичного кадра, обработка не критичного кадра прекращается, она продолжается после завершения обработки критичного кадра. Некритичный кадр может быть прерван несколько раз, пока не будет достигнуто ограничение по количеству прерываний. Это ограничение количества прерываний передачи не критичного кадра определено поправкой IEEE 802.1Qbv.

Цель этой поправки состоит в том, чтобы предотвратить слишком долгое обслуживание не критичных кадров, в то время как цель поправки IEEE 802.1Qbv – уменьшить задержку передачи

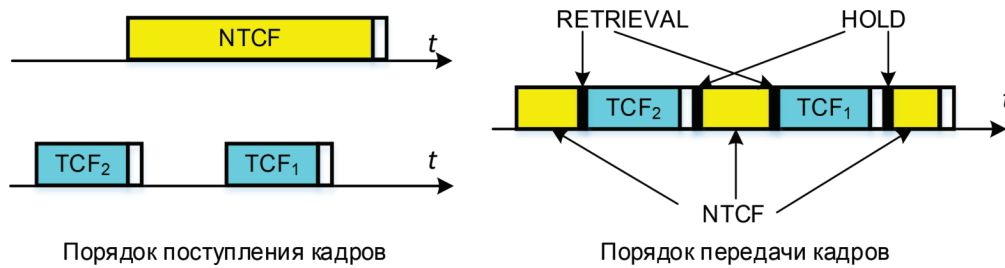


Рисунок 7. Пример прерывания передачи кадра на основе IEEE 802.1Qbu

для критичных ко времени кадров. Так, без прерывания кадр с размером MTU в 1500 байт может заблокировать порт 1 Гбит/с примерно на 12,5 мкс, в то время как прерывание кадра ограничивает максимальное время блокировки порта до приблизительно 1 мкс. Процесс приоритетного прерывания кадров показан на рис. 7. Некритичный кадр *NTCF* прерывается два раза критичными кадрами *TCF₁* и *TCF₂*, которые обрабатываются сразу по поступлении. Два зарезервированных управляющих символа *HOLD* и *RETRIEVAL* используются в качестве индикаторов начала и конца прерывающей вставки критичного кадра в не критичный кадр соответственно.

Приоритетное прерывание передачи кадра на основе стандартов IEEE 802.1Qbu/802.3br используется также для уменьшения величины защитной полосы в кадре TSN Ethernet. Она выбирается равной наибольшему возможному размеру фрагмента, а не всего мешающего кадра. При этом размер фрагмента должен быть не менее 64 байт.

Надежность передачи данных (IEEE 802.1CB). Высокая надежность работы промышленных сетей обеспечивается резервированием маршрутов передачи данных с использованием различных протоколов (RSTP, MRP, DLR и др.), которые позволяют изменять сетевую топологию в случае возникновения каких-либо неисправностей. Время изменения топологии сети (называемое «временем восстановления») занимает от миллисекунд до секунд в зависимости от используемого протокола. В течение этого времени связь с частью сети отсутствует и, следовательно, теряются данные. Однако резервирование сети возможно не только за счет перестроения топологии, но и за счет дублирования передаваемых кадров – так называемого «бесшовного» резервирования.

Передаваемый кадр дублируется отправителем, и оба кадра отправляются по разным маршрутам в сети, а принимающий узел обрабатывает кадр, пришедший первым, и отбрасывает второй. Данный принцип резервирования не требует выполнения перестроения сетевой топологии,

и, соответственно, данный протокол действует практически «бесшовно», а полоса пропускания в сети используется гораздо эффективнее, чем при традиционном резервировании. При этом «бесшовное» резервирование реализуется на конечных узлах, а не на сетевых устройствах. Механизм бесшовного резервирования сетей TSN кольцевой или ячеистой топологии описан в стандарте IEEE 802.1CB.

Принципы построения сетей TSN Ethernet

Сеть TSN состоит из узлов двух типов: конечных устройств (*end point*) и коммутаторов (их часто называют мостами – *bridge*) – см. рисунок 8. Конечные устройства либо отправляют (их называют *talker*), либо получают данные (их называют *listener*), но не транслируют их. Коммутаторы (мосты), наоборот, только транслируют данные, но не создают, не потребляют и не изменяют их. Коммутаторы обеспечивают передачу и прием кадров Ethernet TSN-потоков между конечными точками напрямую или через другие коммутаторы на основе расписания под управлением сетевого контроллера (планировщика).

Подключение к другим узлам осуществляется через исходящий порт. Каждый исходящий порт имеет свои собственные очереди, и каждый порт подключен только к одному входящему порту другого узла. Следовательно, на каждом узле может быть более одного исходящего порта. Число портов приема и передачи может отличаться друг от друга. Отличительная особенность сети TSN – наличие собственных часов (генератора синхросигналов) внутри каждого узла. Они используются для синхронизации времени работы шлюзов между узлами, чтобы реализовать возможность защищенного временного окна. В порты коммутатора TSN могут включаться также устройства (коммутаторы и конечные устройства), не поддерживающие стандарты TSN. Таким образом, обычные Ethernet-устройства и TSN-устройства могут работать в одной сети. Стандартным Ethernet-устройствам не требуется дополнительных интерфейсов или шлюзов для подключения к

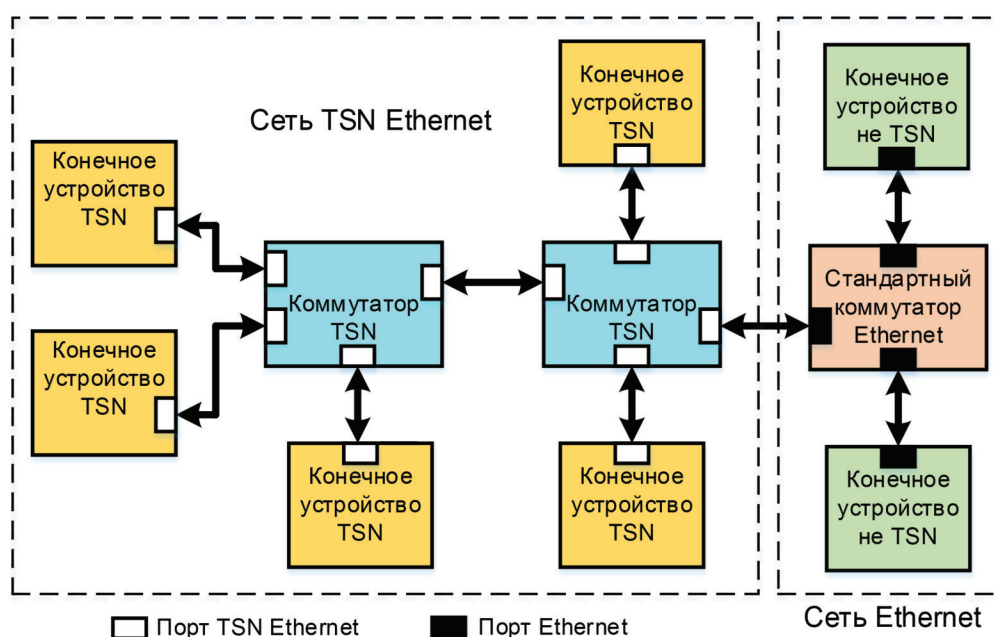


Рисунок 8. Компоненты сети TSN

TSN-сетям. Однако только TSN-устройства смогут обеспечивать связь в режиме реального времени.

Ключевым понятием сети TSN является TSN-поток – термин, используемый для описания критичной ко времени связи между конечными устройствами. Каждый TSN-поток однозначно идентифицируется сетевыми устройствами и предъявляет жесткие временные требования, которые должны быть реализованы этими устройствами. Для идентификации TSN-поточков в стандарте IEEE 802.1CB предлагается несколько способов: по MAC-адресу и идентификатору VLAN получателя, MAC-адресу и идентификатору VLAN отправителя и другие. Идентификация используется для обнаружения определенного потока данных, передаваемого по сети TSN, а также для обработки резервных маршрутов для обеспечения отказоустойчивости.

Неотъемлемой частью технологии TSN является модель управления, которая управляет трафиком, маршрутизирует потоки в сети, а также позволяет настраивать семейство протоколов IEEE для успешной работы в единой системе. Согласно стандарту IEEE 802.1Qcc, существует три возможные модели управления сетью TSN [2].

1. Централизованная модель – конечные устройства передают в централизованную систему управления требования по передаче TSN-поточков в сети. На основании полученных запросов система централизованного управления составляет необходимое расписание для всех потоков в сети, чтобы удовлетворить этим требованиям, и соответствующим образом настраивает коммутаторы и конечные устройства.

2. Децентрализованная модель – приложения на конечных устройствах уведомляют коммутаторы по пути передачи данных о необходимости зарезервировать ресурсы для конкретного потока трафика. При такой модели не требуется система централизованного управления.

3. Смешанная (гибридная) модель – потоки данных от конечных устройств передаются на ближайший коммутатор по стандартизированному протоколу. Затем коммутатор обращается в систему централизованного управления для составления расписания работы коммутаторов в сети. В этой модели система централизованного управления управляет только передачей отдельных TSN-поточков между коммутаторами, не обращаясь к требованиям потоков данных от каждого конечного устройства. Для промышленных сетей подходит только полностью централизованная модель, поскольку только она обеспечивает передачу изохронного трафика.

В последнее время ряд ведущих мировых производителей начали выпуск различного оборудования сетей TSN (коммутаторы, системы на кристалле, сетевые карты, наборы программируемых логических интегральных схем FPGA и др.), которое разработано в соответствии со стандартами IEEE (см. таблицу 6).

Промышленный консорциум OPC Foundation разработал полностью открытую технологию передачи данных в режиме реального времени OPC UA TSN [10], объединяющую два стандарта: спецификацию OPC UA [11], которая определяет передачу данных в промышленных сетях, и технологию TSN. OPC UA TSN способна обеспечить

Таблица 6. Примеры выпускаемого оборудования сетей TSN Ethernet

Продукт	Компания (страна)	Назначение	Характеристики портов	Поддерживаемые стандарты TSN
Семейство коммутаторов Cisco IE-4000	Cisco (США)	Коммутатор TSN	4 uplink порта GE combo От 8 до 16 портов FE/GE combo	IEEE 802.1AS IEEE 802.1Qbv
Семейство коммутаторов SparX-5i	Microchip (США)	Однокристальный коммутатор TSN	До 64x1G/2,5G 32x5G 20x10G 8x25G	IEEE 802.1AS-Rev IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qch IEEE 802.1Qci IEEE 802.1CB IEEE 802.1Qbu
RELY-TSN-BRIDGE	Relyum (Испания)	Коммутатор TSN	4 порта 10/100/1000 Ethernet	IEEE 802.1AS IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu IEEE 802.1Qcc IEEE 802.1CB IEEE 802.1Qci IEEE 802.1Qav
EKI-8510G-2FI	Advantech (Тайвань)	Коммутатор TSN	Емкость коммутатора – 20 Гбит/с 8 портов GE 2 порта SFP	IEEE 802.1AS IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu IEEE 802.1CB IEEE 802.1Qci
Edge IP Solution	TTTech (Австрия)	Набор IP-блоков для FPGA, реализующих TSN	От 3 до 5 портов 100/1000 Ethernet	IEEE 802.1AS IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu IEEE 802.1Qcc IEEE 802.1CB
PCIE-0400-TSN	Kontron S&T AG (Германия)	Промышленная сетевая карта с поддержкой TSN	4 порта 10/100/1000 Ethernet	IEEE 802.1AS IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu IEEE 802.1Qcc

бесшовное взаимодействие между различными промышленными устройствами от разных производителей, и ее использование приведет к росту производительности, снизит совокупную стоимость владения, упростит ввод в эксплуатацию, техническое обслуживание и внедрение инновационных решений. Эта технология поддерживается всеми крупными игроками на рынке поставщиков систем автоматизации.

Тестирование оборудования TSN

При практической реализации сетей TSN следует учитывать, что конкретное TSN-совместимое устройство не обязательно поддерживает все стандарты TSN. При выборе оборудования необходимо также учитывать, что ряд стандартов TSN зависят друг от друга. Кроме того, конкретное оборудование может поддерживать определенный набор из семейства стандартов TSN в зависимости от того, какой вариант использования оно решает: общая синхронизация по времени различных устройств в сети, гарантированная максимальная задержка или сосуществование трафика с гарантированной задержкой с фоновым или другим трафиком. Например, ряд стандартов требует реализации не только в конечных узлах, но и в коммутаторах сети TSN.

В то же время другие стандарты относятся только к конечным узлам или только к коммутаторам. Поэтому на практике часто возникает вопрос о проверке поддержки оборудованием и программным обеспечением определенных стандартов TSN, а также о проверке совместимости оборудования разных производителей.

Для проверки совместимости оборудования TSN от различных поставщиков, а также для тестирования различных приложений в настоящее время существуют четыре испытательных стенда, организованных European Edge Computing Consortium (EECC) в Германии, Industrial Internet Consortium (IIC) в США, Labs Network Industrie 4.0 (LNI4.0) в Германии и Alliance of Industrial Internet (AII) в Китае.

Консорциум промышленного Интернета IIC (Industrial Internet Consortium) создал специальный стенд (см. рисунок 9), на котором партнеры проекта имеют возможность попробовать свое оборудование и программное обеспечение (ПО) в тестовой инфраструктуре. Это позволяет определить, какие из фирменных решений TSN являются работоспособными и совместимыми с продуктами других производителей [12].

В 2017 г. немецкая ассоциация Labs Network Industrie 4.0 (LNI 4.0) построила собственную

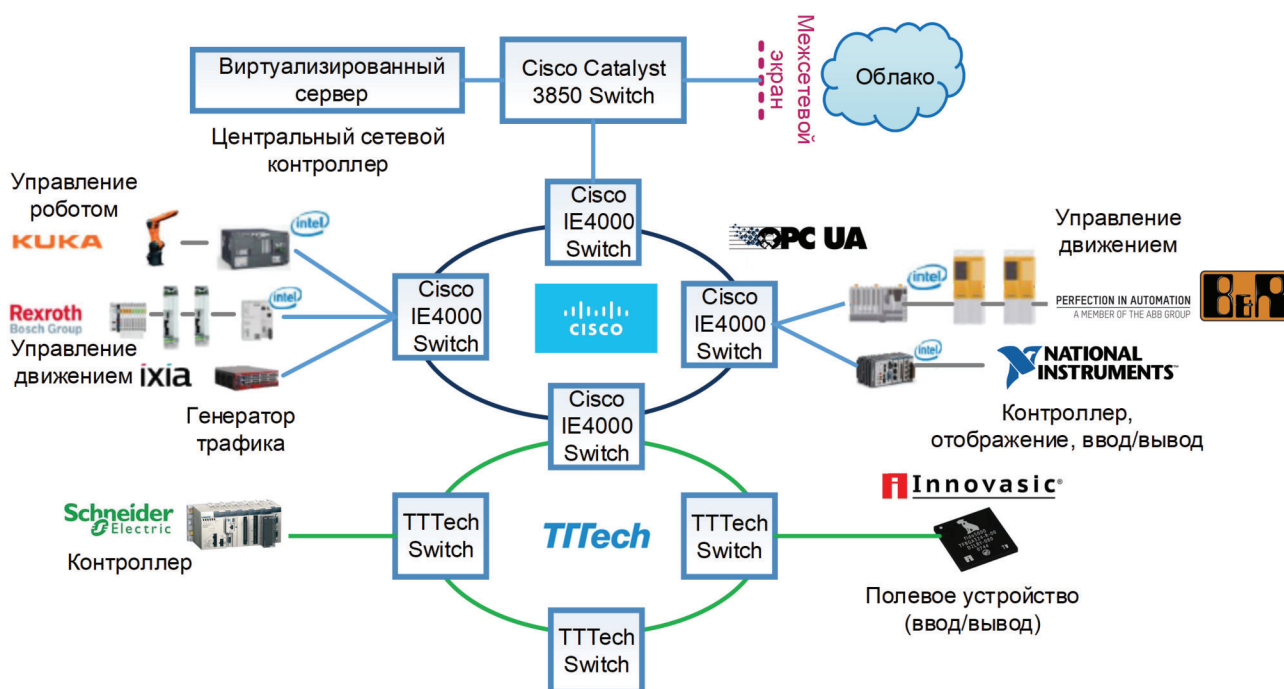


Рисунок 9. Схема испытательного стенда ИС для проверки совместимости решений TSN разных производителей

тестовую установку OPC UA TSN для проверки объединенной технологии на основе спецификации передачи данных в промышленных сетях OPC UA и технологий TSN [13]. Архитектура OPC UA over TSN позволяет проприетарному оборудованию, использующему различные протоколы, подключаться к унифицированной архитектуре OPC для обмена данными.

Основное отличие этих испытательных лабораторий заключается в подходе к конфигурации сетевого оборудования. ИС использует централизованный подход, который подразумевает, что каждое устройство настраивается отдельно через универсальное конфигурационное ПО. LNI4.0 придерживается децентрализованного подхода, при котором распределение потоков в сети происходит автоматически с помощью специальных протоколов резервирования. Этот подход позволяет осуществлять plug&play подключение устройств.

Отдельно следует отметить проект с открытым исходным кодом OpenTSN [14], который поддерживает быструю настройку систем TSN. Среда OpenTSN включает два аппаратных компонента – коммутатор TSNSwitch и сетевую карту TSNNic – и один программный компонент – TSNLight. TSNSwitch и TSNNic реализованы на базе программируемых вентильных матриц FPGA (Field-Programmable Gate Array). TSNLight – это программный контроллер сети TSN, который управляет сетевыми устройствами в централизованном режиме. С помощью этих компонентов

разработчики могут построить базовую систему TSN, настроив соответствующие компоненты в соответствии со стандартами IEEE 802.1 TSN и требованиями к их применению.

Заключение

Технология чувствительных ко времени сетей TSN, разработанная рабочей группой IEEE 802.1, обладает всеми достоинствами классической технологии Ethernet, но дополнительно позволяет соблюдать жесткие требования к задержкам и надежности передачи, которые необходимы приложениям, работающим в режиме реального времени (автоматизация производства, беспилотный транспорт, телемедицина, киберфизические системы, услуги URLLC в мобильных сетях 5G и др.).

Сеть TSN работает на втором уровне модели OSI, что позволяет использовать ее для любых технологий, базирующихся на технологии Ethernet. Кроме того, коммутируемая сеть TSN превосходит промышленные решения Ethernet реального времени по стабильности передачи данных, имеет меньшие задержки низкоприоритетных сообщений, более гибко адаптируется к модификациям конфигурации, обеспечивает более высокую пропускную способность и является более экономичной. Так, исследования, проведенные на установках ИС и LNI 4.0, показали, что по производительности технология OPC UA TSN опережает существующие протоколы промышленного Ethernet в 18 раз [15].

С другой стороны, сети TSN легко стыкуются с сетями классического Ethernet, обеспечивая экономичную совместную передачу как критичного ко времени изохронного трафика, так и трафика, не требующего строгих гарантий задержек (например, аудио и видео), или вообще без гарантий (best effort). Наличие в сети TSN разнородного трафика, предъявляющего разные требования к качеству обслуживания QoS, создает ряд сложных теоретических и практических задач, таких как составление расписания работы сетевых узлов, поиск оптимальных маршрутов передачи потоков трафика и оценка граничных значений сквозных задержек. Это доказывает целесообразность дальнейших исследований и разработок технологий TSN Ethernet.

Работа поддержана грантом по программе Фонда содействия инновациям «УМНИК-20» (Цифровая экономика) (708ГУЦЭС8-D3/63774 от 15.12.2020).

Литература

1. Киселев С. Ethernet реального времени // Электронные компоненты. 2020. № 6. С. 22–25.
2. Time-Sensitive Networking Task Group. URL: <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html> (дата обращения: 15.02.2021).
3. Тейлор А., Запке М. TSN: конвергентные сети для улучшения работы IIoT // Беспроводные технологии. 2018. № 1. С. 46–49.
4. Fronthaul evolution: From CPRI to Ethernet / N.J. Gomes [et al.] // Optical Fiber Technology. 2015. Vol. 26. Part A. P. 50–58.
5. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети // Современные технологии автоматизации. 2020. Часть 1. № 1. С. 18–22; Часть 2. № 2. С. 22–27.
6. Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. Стандартизация синхронизируемых по времени сетей TSN // Стандарты и качество. 2021. № 4. С. 29–33.
7. IEEE 802.1Q-2018 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_1Q-2018.html (дата обращения: 15.02.2021).
8. IEEE 802.1D – MAC bridge. URL: <https://www.ieee802.org/1/pages/802.1D.html> (дата обращения: 15.02.2021).
9. Time-Sensitive Networking. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Time-Sensitive_Networking (дата обращения: 15.02.2021).
10. Иванов И.В. OPC UA – новый виток революции // Автоматизация в промышленности. 2017. № 2. С. 7–9.
11. Бина Ш., Брукнер Д., Васина А.С. OPC UA TSN как технология для обеспечения связи на всех уровнях автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2019. № 2. С. 26–34.
12. Тейлор А., Запке М. TSN: конвергентные сети для улучшения работы IIoT // Беспроводные технологии. 2018. № 1. С. 46–49.
13. Testbed TSN (Time-Sensitive Networking). URL: https://lni40.de/lni40-content/uploads/2019/08/LNI_Use-Case_TESTBED-TSN-TIME-SENSITIVE-NETWORKING.pdf (дата обращения: 15.02.2021).
14. OpenTSN: an open-source project for time-sensitive networking system development / W. Quan [et al.] // CCF Transactions on Networking. 2020. Vol. 3. P. 51–65.
15. OPC UA TSN. A new Solution for Industrial Communication / D. Bruckner [et al.]. URL: <https://www.moxa.com/Moxa/files/66/6669d232-4227-440a-9ddf-477e70b11780.pdf> (дата обращения: 15.02.2021).

Получено 15.02.2021

Росляков Александр Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сетей и систем связи (ССС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-69-25. E-mail: arosl@mail.ru

Герасимов Вячеслав Васильевич, аспирант кафедры СССР ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-69-25. E-mail: slavon131@bk.ru

Мамошина Юлия Сергеевна, магистрант кафедры СССР ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-69-25. E-mail: yulia131098@mail.ru

Сударева Мария Евгеньевна, магистрант кафедры СССР ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-69-25. E-mail: masha_sudareva@mail.ru

TSN ETHERNET – TIME-SENSITIVE NETWORKING*Roslyakov A.V., Gerasimov V.V., Mamoshina Yu.S., Sudareva M.E.**Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation**E-mail: arosl@mail.ru*

Currently, most local and regional switched packet data networks are built using Ethernet technology, which is the focus of the IEEE 802 group of standards. It has many advantages – high bandwidth, simplicity, scalability, compatibility, etc. But on the other hand, in Ethernet networks there is no predictability in data delivery, which limits their use in real-time systems, especially for industrial applications. Therefore, the IEEE has developed a special modification of Ethernet technology – Time-Sensitive Networking (TSN). TSN technology is based on the IEEE 802.1 and IEEE 802.3 standards and therefore is fully compatible with classic Ethernet technology, but at the same time provides a minimum and predictable data packet delay level. In recent years, TSN technology has begun to be actively implemented not only in industrial networks, for example, industrial Internet of things IIoT networks, but also in traditional communication networks, for example, to implement the fronthaul segment in 5G networks. However, information on TSN networks is practically not covered and is not summarized on the pages of domestic publications. With this in mind, this article provides an overview of TSN standards, technologies and principles for building time-sensitive networks.

Keywords: *Ethernet technology, Time-Sensitive Networking, IEEE 802.1 standards, network synchronization, time aware shaper, credit base shaper*

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.2.07

Roslyakov Alexander Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Networks and Communication Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 333-69-25. E-mail: arosl@mail.ru

Gerasimov Vyacheslav Vasilyevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD Student. Tel. +7 846 333-69-25. E-mail: slavon131@bk.ru

Mamoshina Yuliya Sergeevna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Postgraduate Student. Tel. +7 846 333-69-25. E-mail: yulia131098@mail.ru

Sudareva Mariya Evgenyevna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Postgraduate Student. Tel. +7 846 333-69-25. E-mail: masha_sudareva@mail.ru

References

1. Kiselev S. Real time Ethernet. *Elektronnye komponenty*, 2020, no. 6, pp. 22–25. (In Russ.)
2. Time-Sensitive Networking Task Group. URL: <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html> (accessed: 15.02.2021).
3. Tejlor A., Zapke M. TSN: converged networks for better performance IIoT. *Besprovodnye tehnologii*, 2018, no. 1, pp. 46–49. (In Russ.)
4. Gomes N.J. et al. Fronthaul evolution: From CPRI to Ethernet. *Optical Fiber Technology*, 2015, vol. 26, pp. 50–58.
5. Vorob'ev S. TSN – time synchronized networks. *Sovremennye tehnologii avtomatizatsii*, 2020, part 1, no. 1, pp. 18–22, part 2, no. 2, pp. 22–27. (In Russ.)
6. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V., Mamoshina Yu.S., Sudareva M.E. Standardization of time-synchronized networks TSN. *Standarty i kachestvo*, 2021, no. 4, pp. 29–33. (In Russ.)

7. IEEE 802.1Q-2018 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_1Q-2018.html (accessed: 15.02.2021).
8. IEEE 802.1D – MAC bridge. URL: <https://www.ieee802.org/1/pages/802.1D.html> (accessed: 15.02.2021).
9. Time-Sensitive Networking. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Time-Sensitive_Networking (accessed: 15.02.2021).
10. Ivanov I.V. OPC UA – new round of revolution. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2017, no. 2, pp. 7–9. (In Russ.)
11. Bina Sh., Bruckner D., Vasina A.S. OPC UA TSN as a technology for communication at all levels of automation. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2019, no. 2, pp. 26–34. (In Russ.)
12. Tejlор A., Zapke M. TSN: converged networks for better performance IIoT. *Besprovodnye tehnologii*, 2018, no. 1, pp. 46–49. (In Russ.)
13. Testbed TSN (Time-Sensitive Networking). URL: https://lni40.de/lni40-content/uploads/2019/08/LNI_Use-Case_TESTBED-TSN-TIME-SENSITIVE-NETWORKING.pdf (accessed: 15.02.2021).
14. Quan W. et al. OpenTSN: an open-source project for time-sensitive networking system development. *CCF Transactions on Networking*, 2020, vol. 3, pp. 51–65.
15. Bruckner D. et al. OPC UA TSN. A new Solution for Industrial Communication. URL: <https://www.moxa.com/Moxa/files/66/6669d232-4227-440a-9ddf-477e70b11780.pdf> (accessed: 15.02.2021).

Received 15.02.2021

УДК 004

ЭЛЕКТРОННЫЕ КЛЮЧИ КАК МЕТОД ЗАЩИТЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Василенко К.А.¹, Золкин А.Л.², Ляпунов В.Н.¹, Семейкин В.А.³

¹ Владивостокский государственный институт экономики и сервиса, Владивосток, РФ

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

³ Морской государственный университет адм. Г.И. Невельского, Владивосток, РФ

E-mail: k2857@mail.ru, alzolkin@list.ru, liapunov_vitalii_nikolaevich@vvsu.ru, vlad_6653496@mail.ru

В статье описываются принципы работы, виды технической реализации и способы применения электронных ключей. Также были рассмотрены основные российские производители электронных ключей, и выявлены особенности их продуктов. При обеспечении должным образом информационной безопасности компании необходимо учитывать правильную настройку и поддержку аппаратных и программных средств защиты информации во избежание убытков, с целью ликвидации рисков получения электронного ключа злоумышленником. Учитывая, что электронные ключи чаще всего относят к аппаратным способам защиты программ от взлома, при этом имеются улучшенные кроссплатформенные аппаратно-программные решения. Их существование обусловлено тем, что разработчики, проектирующие электронные ключи, также предоставляют и комплект разработчика программного обеспечения (SDK) к ним. Компании в своих собственных программных продуктах имеют возможность реализации с помощью SDK всех средств защиты электронных ключей, таких как средства разработки, защита фрагментов кода программы, разработка инструментов автоматической защиты и многое другое.

Ключевые слова: электронные ключи, смарт-карты, методы защиты информации, программное обеспечение, несанкционированный доступ, злоумышленник, сервер, зашифрованный код, ключи активации, идентификация

Введение

Защита программного обеспечения и электронных документов с использованием электронных ключей существует уже много лет, и она до сих пор показывает свою эффективность. Электронный ключ (аппаратный ключ, донгл) – это аппаратное средство, в основе которой лежит

специальная микросхема, защищающая программное обеспечение и документы от незаконного копирования, использования и распространения третьими лицами.

История аппаратных ключей берет начало в начале 1980-х годов. К их появлению привела одна причина [1; 2]. Наличие защиты программ-