

Применение технологии TSN в промышленных сетях связи

Н.Л.Сторожук, к.т.н., генеральный директор АО НПП "КОМЕТЕХ" / snl@kometeh.ru

УДК 621.395.44, DOI: 10.22184/2070-8963.2025.126.2.48.52

Происходящая сегодня четвертая промышленная революция влечет за собой значительные изменения во всех секторах промышленности и выдвигает новые требования к качеству передачи данных в каналах технологических сетей связи. Рассматриваются поставленные в результате развития производственных процессов задачи перед сетями связи и возможности технологии TSN в части их решения и соответствия новым требованиям.

Введение

Напомним, в истории человечества были три промышленные революции, основанные на внедрении в производственные процессы паровой энергии, электричества, электроники и информационных технологий. Сегодня происходит четвертая промышленная революция, получившая название "Индустрия 4.0", характеризующаяся цифровой трансформацией посредством перевода бизнес-процессов в цифровой формат и повсеместного внедрения информационных и киберфизических систем (CPS – Cyber-Physical System), а также обмена данными между ними без участия человека. Это влечет за собой значительные изменения во всех секторах промышленности. Широкое использование Интернета вещей (IoT) и CPS приводит к преобразованию системы управления производством в сеть взаимосвязанных интеллектуальных устройств, что позволяет повысить ее гибкость, универсальность и эффективность.

Телекоммуникационные технологии для промышленных сетей

Новые промышленные технологии выдвигают новые требования как к параметрам каналов связи, так и к их пропускной способности. Интеллектуальные производственные системы не могут функционировать без

гарантирования ультрамалых задержек передачи данных, не говоря уже о перебоях и разрывах соединений. Хотя конкретные требования к разным приложениям различаются, они объединяют в себе общую потребность в управлении параметрами каналов передачи данных в режиме реального времени [1].

Для удовлетворения этих требований были разработаны различные коммуникационные технологии [2]:

- шина процесса полевого уровня (Profibus – Process Field Bus), предназначенная для построения систем управления промышленным оборудованием на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК);
- открытый промышленный стандарт для автоматизации – сеть полевого уровня (PROFINET – Process Field Network);
- стандарт промышленной сети (EtherCAT – Ethernet for Control Automation Technology), используемой для распределенного управления в реальном времени.

Каждое из этих решений соответствует определенному набору требований для конкретных приложений. В результате они совместимы только на физическом уровне. Это приводит к большому разнообразию протоколов и оборудования, что затрудняет достижение взаимосвязи,

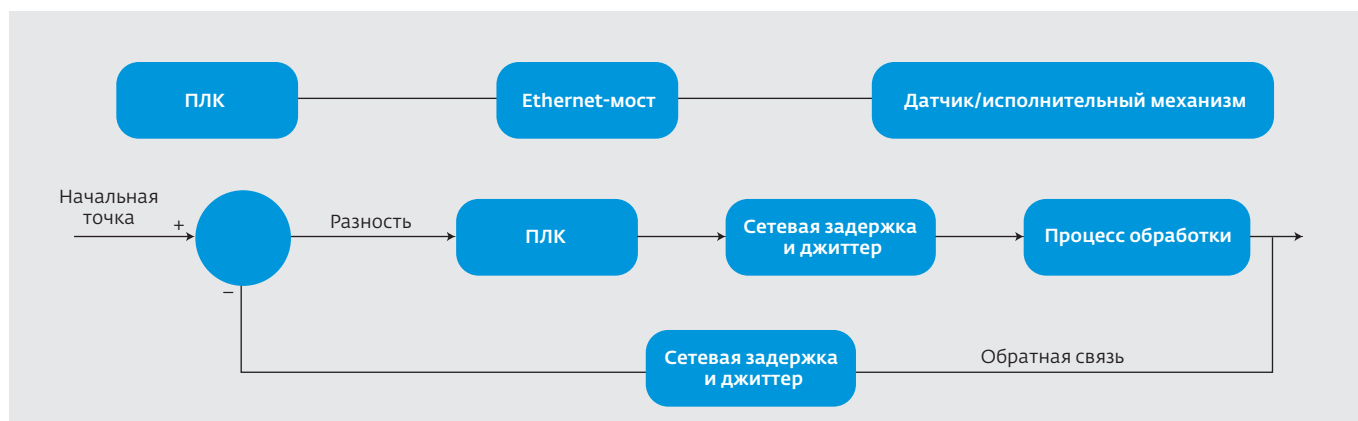


Рис.1. Управление с разомкнутым или замкнутым контуром

необходимой для полноценной автоматизации производственных процессов. Целевой группой по работе с сетями, зависящими от времени (Time-Sensitive Networking task group), сформированной в ноябре 2012 года в составе рабочей группы по стандартизации Института инженеров электротехники и электроники (IEEE), были разработаны стандарты группы IEEE 802.1 для сетей, зависящих от времени (TSN – Time-Sensitive Networking) [3]:

- IEEE 802.1AS-Rev/D2.0 (протокол синхронизации точного времени);
- IEEE 802.1CB (репликация и устранение кадров для обеспечения надежности);
- IEEE 802.1Qbv (планирование расписания доставки пакетов);
- IEEE 802.1Qci (правила обработки и фильтрации потоков данных);
- IEEE 802.1Qcc (резервирование потоков данных);
- IEEE 802.1Qbu (прерывание передачи кадров).

Технология TSN имеет существенные преимущества для использования в промышленных сетях, она базируется на трех ключевых принципах:

1. синхронизация сети во времени;
2. планирование трафика;
3. планирование и резервирование маршрутов передачи данных.

Преимущества TSN при использовании в промышленных сетях

Сети связи с технологией TSN оптимальны для использования в сегментах центрального управления, магистральных сегментах и сегментах локальных машин производственных линий, что позволяет использовать классический стандарт Ethernet для приложений реального времени в соответствии с требованиями современных промышленных технологий.

В дополнение к задачам использования на производственных предприятиях и требованиям к совместимости промышленная телекоммуникационная сеть также должна поддерживать беспроводную связь. Применение систем беспроводной связи позволяет снизить затраты на оборудование и модернизировать производственные мощности в более широком масштабе [2]. Однако из-за отсутствия доступности, надежности и возможности работы в режиме реального времени использование беспроводных средств связи в прошлом ограничивалось приложениями с разомкнутым контуром управления. Пятое поколение беспроводных систем (5G) соответствует современным требованиям по передаче данных для широкого спектра промышленных приложений полевого (нижнего) уровня. В результате TSN и 5G в сочетании предлагают беспроводные и проводные решения, способные создать крупномасштабную сеть для обеспечения процессов цифровой трансформации производства.

Для реализации концепции "Индустрии 4.0" требуется конвергентное использование проводных и беспроводных технологий связи. Поскольку приложения меняются, сеть должна быть готова к таким изменениям. В гибкой производственной системе любой критический процесс обычно основан на управлении либо с разомкнутым контуром, при котором нет обратной связи, с помощью которой можно получить информацию о том, что происходит, либо с замкнутым контуром, где выходные параметры измеряются и обрабатываются контроллером, а результат обработки подается обратно в процесс в качестве входных данных, как показано на рис.1 [2].

Чтобы обеспечить детерминированное поведение управляющего приложения, сеть должна удовлетворять соответствующим требованиям к качеству обслуживания (QoS). QoS определяется прежде всего такими параметрами, как задержка, джиттер и процент потери

Таблица 1. Типы трафика промышленной автоматизации, требования к обслуживанию и связанные с ними функции TSN

Типы трафика	Периодический/спорадический	Типичный период	Гарантированная доставка данных	Чувствительность к джиттеру	Чувствительность к потерям	Типичный размер данных (байт)	Критичность	Приоритеты трафика	Строгий приоритет (стандарт IEEE 802.1 Q)	Резервирование (стандарт IEEE 802.1 CB)	Синхронизация времени (стандарт IEEE 802.1 AS)	Трафик по расписанию (стандарт IEEE 802.1 Qbv)	Упреждение кадра (стандарт IEEE 802.1 Qbu)	PSFP (стандарт IEEE 802.1 qci)	TSN конфигурация (стандарт IEEE 802.1 Qcc)
Изохронный	П	100 мкс ~ 2 мс	В срок	0	Нет	Фиксированный: 30 ~ 100	Высокая	6	М	О	Да	М		М(T)	М
Циклически-синхронный	П	500 мкс ~ 1 мс	Граничная задержка (τ)	≤τ	Нет	Фиксированный: 50 ~ 100	Высокая	5	М	О	Да	М		М(T)	М
Циклически-асинхронный	П	2 мс ~ 20 мс	Граничная задержка (τ)	≤τ	1–4 кадра	Фиксированный: 50 ~ 100	Высокая	5	М	О	Нет		R	М(R)	М
События: контроль	С	10 мс ~ 50 мс	Граничная задержка (τ)	Нет данных	Да	Переменный: 100 ~ 200	Высокая	4	М	О,	Нет		О	М(R)	М
События: сигнал тревоги и команды оператора	С	2 с	Граничная задержка (τ)	Нет данных	Да	Переменный: 100 ~ 1500	Средняя	3	М	О	Нет		О	М(R)	М
Сетевое управление	П	50 ms ~ 1 s	По пропускной способности	Да	Да	Переменный: 50 ~ 500	Высокая	7	М	О	Нет				
Конфигурация и диагностика	С	Нет данных	По пропускной способности	Нет данных	Да	Переменный: 500 ~ 1500	Средняя	2	М				О	М(R)	М
Видео	П	Частота кадров	По пропускной способности	Нет данных	Да	Переменный: 1000 ~ 1500	Низкая	1	М	О	Нет		О	М(R)	М
Аудио/голос	П	Частота дискретизации	По пропускной способности	Нет данных	Да	Переменный: 1000 ~ 1500	Низкая	1	М	О	Нет		О	М(R)	М
BE трафик	С	Нет данных	Нет	Нет данных	Да	Переменный: 30 ~ 1500	Низкая	0	М				О		

1. М: обязательный, (T): контроль на основе времени, (R): контроль на основе вставок, О: необязательный, R: рекомендуемый.
2. Временная синхронизация относится к синхронизации времени передачи данных с сетевым циклом для синхронной работы сети TSN, кроме того, некоторым приложениям может потребоваться синхронизация времени по сети.
3. Для видеокамер трафик может быть циклически-асинхронным, а сами камеры синхронизируются на уровне приложения с требуемой точностью в диапазоне 1–10 мкс.
4. Чувствительность к джиттеру: этот параметр применим к большинству типов периодического трафика, в случае циклического трафика джиттер должен быть меньше гарантированной задержки.
5. Чувствительность к потерям: устойчивость приложения к определенной степени последовательной потери пакетов.
6. Типичный размер данных: размер сообщения приложения; согласно стандарту IEEE 802.3 размер полезной нагрузки кадра Ethernet составляет от 46 до 1500 байт.

информационных пакетов. Кроме того, пропускная способность в конвергентной сети тоже очень важна. Трафик в промышленных сетях может быть спорадическим, то есть сообщение может передаваться приложением в любое время, или периодическим, когда сообщения передаются регулярно по циклической схеме [4].

Сеть связи на базе TSN – это конвергентная сеть, которая допускает сочетание различных типов трафика:

- с заданным временем доставки (TT – Time Triggered);
- с ограничением скорости (RC – Rate Constrained);
- без гарантии, по принципу "приложив все усилия" (BE – Best Effort).

Требования к обслуживанию варьируются с учетом всех этих типов трафика. Несколько организаций, например партнерство 3GPP, Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE), Консорциум промышленного интернета (IIC), определили типы трафика и соответствующие требования, имеющие отношение к промышленной автоматизации. Они обобщены в табл.1 [4].

Проблемы передачи различных типов трафика в промышленных сетях

Как отмечалось выше, в промышленных сетях трафик может носить спорадический или периодический характер, а подходящие механизмы QoS для передачи данных выбираются из требований гарантий доставки данных, которых существует три типа:

- крайний срок – описывает верхнюю границу задержки, гарантирует, что пакет будет доставлен получателю к указанному времени. Данный тип гарантии применим к изохронным типам трафика с периодической передачей данных;
- по задержке – гарантирует, что пакет будет доставлен получателю в течение предсказуемого промежутка времени, который варьируется в зависимости от типа трафика;
- по пропускной способности – гарантирует доставку пакетов получателю при зарезервированной пропускной способности.

Типы изохронного, циклического и фиксированного трафика производственных приложений классифицируются как критические для промышленной автоматизации. Как изохронный, так и циклический трафики предполагают периодическую передачу данных. Изохронный трафик предъявляет более строгие требования к производительности сетевых устройств, чем другие его типы. Для циклического трафика, в отличие от изохронного, некоторая величина джиттера и ограниченный процент потери пакетов могут быть приемлемыми.

Циклический тип можно разделить на синхронный циклический и асинхронный циклический. Требования

к обслуживанию синхронного циклического и изохронного трафика аналогичны. Для них обоих требуется синхронизация по времени согласно стандарту IEEE 802.1AS и планирование передачи трафика в соответствии со стандартом IEEE 802.1Qbv. Для асинхронного циклического типа трафика функции синхронизации по времени и трафика по расписанию не требуются.

Трафик событий для сигналов тревоги и команд оператора требует синхронизации времени через сеть, поскольку приложению необходимо отмечать время или отслеживать последовательность событий, например аварийные сигналы на устройствах. Однако его не обязательно синхронизировать с сетевым циклом.

Трафик сетевого управления имеет наивысший приоритет из всех. Потеря пакетов для такого трафика неприемлема, из-за высокой его критичности рекомендуется резервировать некоторую полосу пропускания для управления сетью, например путем выделения некоторой части времени шлюзов передачи, потенциально в сочетании с другими критическими типами трафика.

Набор функций TSN, таких как управление приоритетами, синхронизация времени в соответствии со стандартом IEEE 802.1AS и планирование трафика в соответствии со стандартом IEEE 802.1Qbv, делает данную технологию оптимальной для решения этих задач.

В промышленной автоматизированной сети связи могут быть три сегмента подключения:

1. центр / краевое облако;
2. локальные машины;
3. промышленная магистраль.

Центр – это сегмент, где расположены централизованные функции контроля и управления, такие как централизованные ПЛК, модуль числового программного управления и блок автоматизированного сбора данных. Эти системы, как правило, взаимодействуют с другими устройствами в рамках текущей работы сети промышленной автоматизации. В центральном помещении может размещаться корпоративное пограничное облако, например локальное облако автоматизации.

Сегмент локального оборудования состоит из нескольких машин. Каждая машина оснащена устройствами полевого уровня (например, датчиками, исполнительными механизмами) и может иметь локальный ПЛК.

Промышленная магистраль обеспечивает транспортные услуги для сегмента центрального управления и локальных машинных сегментов. Подключение может быть как между несколькими локальными компьютерами, так и между ними и центральным уровнем управления.

Внедрение технологии TSN в производственные процессы

Применение технологии TSN в промышленном масштабе, вероятно, начнется с обеспечения магистрального подключения для взаимодействующих машин, которые, в свою очередь, используют современные решения для полевых шин, а ПЛК будут подключены к пограничному мосту TSN или к нескольким мостам в промышленной магистральной сети.

Технология TSN полностью совместима с мостами Ethernet, мосты TSN и мосты Ethernet (совместимые со стандартом IEEE 802.1Q-2014) могут сосуществовать в одной сети, работая с некоторыми ограничениями. Например, технология TSN может быть частично внедрена в магистральный сегмент, а устройства с поддержкой TSN можно подключать к устройствам Ethernet и наоборот, без необходимости использования трансляторов протоколов или шлюзов.

Синхронизация TSN-устройств достигается за счет распространения по сети информации о времени, а устройство может находиться одновременно в двух различных временных областях:

1. глобальный/универсальный часовой домен, обычно один для всего предприятия, предоставляющий дату и время;
2. рабочий тактовый домен, обычно один для каждой отдельной машины/ячейки/линии, обеспечивающей высокоточное время.

Для некоторых промышленных приложений, например изохронных или циклически-синхронных, доступ к сети может быть синхронизирован с рабочими часами. Это означает, что мосты TSN в сети должны иметь одинаковое значение времени в цикле данных приложения, сетевом цикле и цикле планирования. В этом случае рабочие часы, используемые для синхронизации приложения, также используются для синхронизации доступа к сети.

Беспроводная сетевая технология пятого поколения также предлагает возможности, специально разработанные для удовлетворения потребностей промышленности, к которым относятся:

1. технология сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC);
2. улучшенная мобильная широкополосная связь (eMBB, англ. Enhanced Mobile Broadband);
3. массовая межмашинная связь (mMTC);
4. поддержка TSN и сценарии развертывания сети для работы в непубличной сети (NPN – Non-Public Networks).

3GPP предложило интеграцию технологий 5G и TSN для сетей связи, критичных ко времени передачи сообщений, – чтобы мобильная сеть с комплексной архитектурой,

предназначенной для поддержки широкого спектра сценариев (5GS – 5G System), взаимодействовала прозрачным образом с сетями TSN для сведения к минимуму влияния на другие объекты. Устройства 5GS действуют как один или несколько виртуальных или логических мостов сети TSN, обеспечивая подключение на уровне управления. Порты TSN в этом случае подключаются на уровне пользователя.

В интегрированной системе 5G-TSN существуют два параллельных процесса синхронизации: синхронизация 5GS и синхронизация TSN. Синхронизация TSN корректирует время часов устройств в сети TSN. Синхронизация 5GS обеспечивает подстройку от внутренних системных часов как времени базовых станций, так и абонентских устройств.

Заключение

Технология TSN в сочетании с беспроводной технологией 5G оптимально подходит для решения задач цифровой трансформации в рамках "Индустрии 4.0". С внедрением TSN связь с минимальной задержкой для критических технологических приложений становится достижимой в конвергентной сети с большим разнообразием типов трафика и на больших расстояниях. Это уменьшает необходимость в локальной установке контроллеров в производственных помещениях и позволяет переместить их в более удобное место, например в центральную аппаратную. Контроллеры можно даже виртуализировать и управлять ими на пограничной облачной платформе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сторожук М.** Мониторинг сетевого трафика в магистральных сетях для обеспечения работы сетей TSN // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2022. № 3. С. 30–33.
2. Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications. 5G-ACIA. [Электронный ресурс]. URL: https://5g-acia.org/media/2021/04/5G-ACIA_IntegrationOf5GWithTime-SensitiveNetworking-ForIndustrialCommunications.pdf. (дата обращения 06.02.2025).
3. **Сторожук М.Н., Киричек Р.В.** Обзор систем мониторинга для протокола TSN // Сборник докладов Научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С.Попова, посвященной Дню радио. 2022. № 1. С. 131–132.
4. **Герасимов В.В., Росляков А.В.** Требования к промышленным коммуникациям и их реализация в сетях TSN // Материалы XXX Российской научно-технической конференции "Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи". Самара, 28 февраля – 3 марта 2023 г. С. 60–61.