

Научная статья

УДК 621.395.44

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-78-86>

EDN:QTKDTT



Повышение точности синхронизации времени за счет тактовой синхронизации в виртуализированных интегрированных системах

 Николай Леонидович Сторожук, storozhuk.nl@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. В последние годы для промышленной автоматизации в качестве базовой архитектуры все чаще находят применение виртуализированные интегрированные системы, в телекоммуникационных сетях которых используется технология TSN, как наиболее подходящая для критически важных приложений, предъявляющих жесткие требования по скорости и гарантированности доставки информации. Качественные параметры сетей TSN, в свою очередь, зависят от точности ее временной синхронизации, поэтому разработка методов повышения точности синхронизации времени устройств сети с коммутацией пакетов является актуальной научно-практической задачей.

Цель: рассмотреть способы повышения точности синхронизации времени в сетях виртуализированных интегрированных систем, использующих технологию TSN, и то, как влияет на это тактовая сетевая синхронизация, которую обеспечивает применение технологии синхронного Ethernet.

Методы: влияние тактовой сетевой синхронизации на точность привязки шкалы времени оценивается по результатам имитационного моделирования процессов временной и тактовой синхронизации в среде AnyLogic.

Результат: в работе показана цепочка взаимодействия информационных и телекоммуникационных технологий, а также обеспечивающих подсистем, показывающих в совокупности принципы работы сложных встраиваемых компьютерных систем и способ определения их характеристик на основе моделирования, также представлены результаты имитационного моделирования, показывающие, что высокая точность привязки шкалы времени и стабильность ее удержания может достигаться путем совместной реализации частотной и временной синхронизации, что играет важную роль в сценариях применения TSN.

Новизна: разработана имитационная модель процессов временной и тактовой синхронизации, позволяющая оценить преимущества использования тактовой сетевой синхронизации в сетях TSN с точки зрения повышения точности синхронизации времени сетевых устройств.

Практическая значимость. Реализация частотной синхронизации в сети с поддержкой технологии TSN позволяет достигать высокой точности синхронизации времени сетевых устройств при использовании меньшего количества синхросообщений, что уменьшает объем служебного трафика. При этом возможно использовать менее стабильные задающие генераторы, так как их частота постоянно корректируется, а это повлечет уменьшение затрат.

Ключевые слова: синхронизация времени, TSN, PTP, gPTP, SyncE, ПЭИВЧ, уПЭИВЧ, шкала времени

Ссылка для цитирования: Сторожук Н.Л. Повышение точности синхронизации времени за счет тактовой синхронизации в виртуализированных интегрированных системах // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 78–86. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-78-86. EDN:QTKDTT

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-78-86>

EDN:QTKDTT

Improving the Accuracy of Time Synchronization Through Frequency Synchronization in Virtualized Integrated Systems

 Nikolay L. Storozhuk, storozhuk.nl@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Relevance. *In recent years, virtualized integrated systems have widely become the base architectural solution for industrial automation systems. TSN technology is being used in their telecommunications networks, as it is the most suitable solution for mission-critical applications with stringent requirements for speed and guaranteed information delivery. The quality of TSN networks, in turn, depends on the accuracy of their time synchronization. Therefore, developing methods to improve the accuracy of time synchronization of packet-switched network devices is a pressing scientific and practical challenge.*

Purpose of the work: *to examine ways to improve the accuracy of time synchronization in networks of virtualized integrated systems using TSN technology, and the impact of network clock synchronization provided by synchronous Ethernet technology.*

Methods used: *the impact of network clock synchronization on the accuracy of timescale reference is assessed using the results of simulation modeling of time and clock synchronization processes in the AnyLogic environment.*

Results: *the paper presents a chain of interactions between information and telecommunication technologies, as well as supporting telecommunication subsystems, demonstrating in aggregate the operating principles of complex embedded computer systems and a method for determining their characteristics based on modeling. The results of simulation modeling are also presented, demonstrating that high accuracy of time scale binding and stability of its retention can be achieved through the joint implementation of frequency and time synchronization, which plays an important role in TSN application scenarios.*

Practical significance: *implementing frequency synchronization in a network supporting TSN technology enables high-precision time synchronization of network devices while using fewer synchronization messages to reduce the amount of service traffic. This allows that to save costs less stable clock generators may be used, as their frequency is consistently adjusted.*

Keywords: *time synchronization, TSN, PTP, gPTP, SyncE, PRTC, ePRTC, time scale*

For citation: Storozhuk N.L. Improving the Accuracy of Time Synchronization Through Frequency Synchronization in Virtualized Integrated Systems. *Proceedings of Telecommunication Universities.* 2025;11(6):78–86. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-78-86. EDN:QTKDTT

Введение

Встраиваемые компьютерные системы стали широко применяться в последние десятилетия в области промышленной автоматизации, например, для замены традиционных механических или гидравлических систем, а также для добавления новых опций и сервисов. В течение многих лет встраиваемые системы, специализированные для конкретного применения, создавались на основе составной архитектуры, предполагающей, что

между всеми аппаратными узлами происходят однозначные взаимодействия. Такие системы обеспечивают высокий уровень надежности при простой архитектуре, но при этом для каждой добавленной функции требуется введение нового аппаратного узла. В связи с этим для критически важных систем приходится увеличивать количество таких узлов с целью повышения отказоустойчивости. В последние годы в качестве базовой архитектуры для современных встраиваемых систем

нашли применение виртуализированные интегрированные системы (ВИС), в которых выделяется облако виртуальных ресурсов для широкого спектра функций, в том числе и для приложений с разным уровнем критичности.

ВИС были представлены в качестве базовой архитектуры для современных встраиваемых систем. В них выделяется облако виртуальных ресурсов для широкого спектра функций, в том числе и для приложений с разным уровнем критичности. Виртуализация обеспечивает продуктивный и адаптируемый метод использования аппаратных ресурсов.

Принципы функционирования ВИС

Виртуализация обеспечивает продуктивный и адаптивный метод использования аппаратных ресурсов. Благодаря созданию виртуализированных версий физических компонентов, таких как сети, хранилища и серверы, можно управлять несколькими отдельными средами на одном физическом компьютере или во всей распределенной системе. Виртуальные ресурсы могут иметь различные ограничения по надежности и быстродействию, что позволяет конфигурировать систему под любую функцию, как критическую. Критическая функция должна иметь эксклюзивный доступ к общим ресурсам в определенные временные интервалы, однако это не должно приводить к ограничению возможностей некритических функций. Разворачивание функции в облаке информационных и сетевых ресурсов устраняет пространственные зависимости. Таким образом, это позволяет использовать плоскую архитектуру в дополнение к иерархической структуре. Кроме того, ВИС требует ограниченного количества модификаций для поддержки любого конкретного применения с определенной структурой и свойствами приложения. Это также приводит к экономии средств и времени на верификацию и сопровождение. На рисунке 1 представлена упрощенная структура ВИС [1].

ВИС является вычислительная среда, в которой на базе одних и тех же аппаратных ресурсов работает множество изолированных друг от друга виртуальных машин, что дает следующие преимущества:

- гибкость (инфраструктура быстро подстраивается и адаптируется под потребности бизнеса);
- экономическая эффективность (снижаются затраты на техническое обеспечение и обслуживание оборудования);
- повышение производительности (рабочие процессы ускоряются, так как вычислительные мощности настроены под конкретные задачи);
- бесперебойность работы программ (виртуальная инфраструктура устойчива к авариям и техническим сбоям).

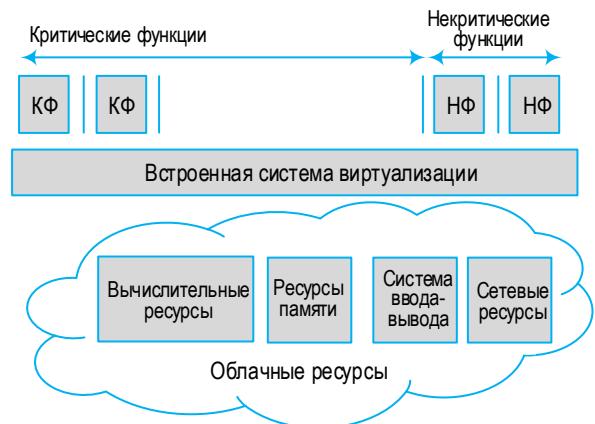


Рис. 1. Архитектура виртуализированной интегрированной системы

Fig. 1. Architecture of a Virtualized Integrated System

Существенными проблемами ВИС являются постоянные изменения конфигурации и высокая сложность управления из-за общих ресурсов. При разработке ВИС создается высоконадежная распределенная платформа с возможностью ее реконфигурации, которая может интегрировать критически важные функции информационной безопасности для большого количества телекоммуникационных ресурсов и позволяет разделить программные и аппаратные компоненты.

К архитектуре ВИС на системном уровне предъявляются требования по обеспечению:

- возможности оптимизации времени и стоимости проектирования, реализации, проверки, развертывания, обновления, реконфигурации и технического обслуживания;
- высокой надежности платформы для критически важных приложений;
- отказоустойчивости;
- возможности интеграции функций с наивысшим уровнем критичности с некритичными функциями без ухудшения производительности и безопасности;
- возможности независимой проверки и сертификации;
- соблюдения строгих требований к задержкам и надежности доставки информации критически важных приложений;
- возможности первоначального развертывания платформы и изменения конфигурации программных и аппаратных компонентов системой управления конфигурацией;
- взаимодействия между аппаратными и программными компонентами различных производителей.

Так как в ВИС различные критические и некритические функции могут быть размещены в любом месте вычислительных ресурсов, любая из них может находиться в разных узлах или его разделах. Следовательно, для связи между функциями

необходима детерминированная сеть, которая играет ключевую роль в ВИС в силу ее распределенного характера. Кроме того, ее нефункциональные характеристики, включая надежность, доступность, целостность, безопасность и ремонтопригодность, являющиеся неотъемлемой составной частью показателей качества передачи информации, зависят от сетевого оборудования. Правильный выбор нужного оборудования из массы предлагаемых устройств подразумевает понимание нормативных требований, которым должны удовлетворять создаваемые линии [2].

Кроме того, сетевые технологии ВИС оказывают значительное влияние на процесс ее функционирования, так как по сети обмениваются трафиком различные сервисы, а каждый класс трафика может иметь свои требования к скорости доставки и безопасности. Таким образом, сеть должна гарантировать детерминированные и надежные коммуникационные услуги для критически важных функций, и в то же время обслуживать менее значимые сервисы. Для этого в сети ВИС используется временное и пространственное разделение коммуникационных ресурсов [1].

Требования к сетевой технологии, используемой ВИС

Для обеспечения работы ВИС, в состав которой входят, в том числе, чувствительные к задержкам передачи информации компоненты, сеть Ethernet должна содержать систему реального времени, включающую необходимые аппаратные средства, операционную систему и прикладное программное обеспечение.

Производительность системы реального времени поддается оценке значительно труднее, чем в системах, использующих последовательные операции. Если операция исполняется с известной скоростью, то скорость работы системы реального времени зависит от управляемых ею технических процессов и событий окружающей среды. Общая производительность системы должна быть достаточной для того, чтобы выполнять все операции и выдавать результаты за установленное время. Иными словами, система реального времени всегда должна быть готова к максимальной нагрузке, которую может создать технический процесс, так как корректность ее работы определяется не только по результатам вычислений, но и по моменту времени, в который эти результаты были получены [3].

Системы реального времени делятся на две категории: системы жесткого и мягкого реального времени. Первые ни при каких условиях не допускают задержек реакции, так как в случае опоздания результаты могут оказаться бесполезны или может произойти катастрофа. Для системы мягкого

реального времени задержка реакции не критична, хотя и может привести к увеличению стоимости результатов и снижению производительности.

Каждая система реального времени обменивается данными с управляемыми объектами, с их исполнительными механизмами и датчиками. Кроме того, компьютерная система реального времени может быть распределенной и состоять из нескольких узлов, которые взаимодействуют через сетевую инфраструктуру. Услуги узла распределенной системы могут быть определены как набор сообщений. Узел отправляет эти сообщения, реагируя на входные данные, течение времени и свое состояние. Таким образом, работа узла тесно зависит от сетевых сервисов реального времени. Структура распределенных систем реального времени показана на рисунке 2.

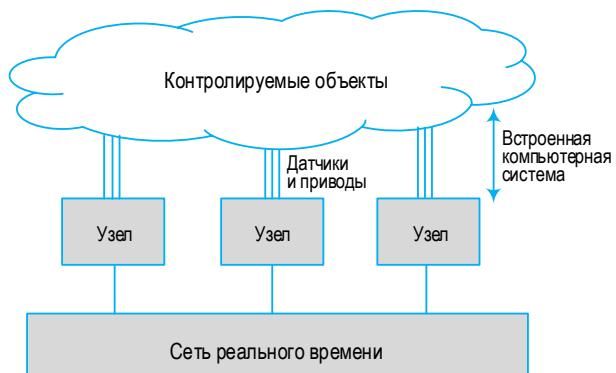


Рис. 2. Структура распределенной системы реального времени
Fig. 2. Structure of a Distributed Real-Time System

На сегодняшний день применительно к телекоммуникационной сети ВИС наиболее оптимальна технология TSN (аббр. от англ. Time-Sensitive Networking – сеть, чувствительная ко времени). При использовании этой технологии сеть Ethernet может обеспечить прогнозируемый уровень задержки пакетов и низкий уровень их потери, а также возможность установки гарантированной полосы пропускания. Назначение технологии TSN состоит в унификации принципов построения коммуникаций путем объединения классического стандарта Ethernet с технологией реального времени в соответствии с требованиями современных ВИС.

При разработке технологии TSN основной упор был сделан на три составляющие:

- 1) точную временнюю синхронизацию;
- 2) детерминированную задержку;
- 3) контролируемую и масштабируемую пропускную способность [4].

Ключевым аспектом TSN является конвергенция синхронного, асинхронного трафика различных уровней критичности в одной сети. Кроме того, эта технология обеспечивает высокую надежность, отказоустойчивую синхронизацию часов и

повышение производительности. Таким образом, сети TSN представляют собой стандартизованные механизмы для обеспечения своевременной передачи данных в сетях Ethernet [5].

Проблемы синхронизации времени в сетях TSN

Процедура синхронизации времени в сетях TSN использует информацию, передаваемую сообщениями обобщенного протокола точного времени (gPTP, *аббр. от англ. generalized Precision Time Protocol*), являющегося профилем протокола точного времени (PTP, *аббр. от англ. Precision Time Protocol*) [6]. Протокол gPTP сужает список опций PTP до критически важных для приложений, чувствительных ко времени, и допускает синхронизацию времени только через Ethernet.

По сравнению с протоколом PTP профиль gPTP имеет следующие преимущества:

- способность обрабатывать топологии крупных сетей, вводя иерархические тактовые домены, что позволяет эффективно синхронизировать их между несколькими уровнями сетевой иерархии;
- обладание продвинутыми механизмами отказоустойчивости для обеспечения надежной синхронизации даже при сбоях в сети или отказах устройств;
- поддержка нескольких временных доменов;
- стандарт IEEE 1588, описывающий профиль PTP, допускает реализацию устройствами синхронизации частоты, а стандарт IEEE 802.1AS, в котором описан профиль gPTP, в свою очередь, не требует применения методов физической регулировки частоты генераторов в силу их медленной сходимости, однако предписывает применять логическую синхронизацию для всех устройств.

Процедура логической синхронизации заключается в вычислении каждым устройством сети отношения частоты его собственных часов к частоте часов соседнего устройства. Последовательное умножение этих отношений для всех устройств, составляющих маршрут между данным устройством и мастером, позволяет получить отношение частоты данного устройства к частоте мастера. Для этого используется информация, передаваемая для расчета коэффициента коррекции частоты генератора. Данный механизм позволяет минимизировать дрейф локальных часов. Но он основан на обмене информацией между взаимодействующими часами, следовательно, значения задержек при передаче служебной информации могут влиять на значение коэффициента коррекции. Исключить влияние задержек, которые могут возникать при логической подстройке частоты генератора, позволяет использование технологии SyncE (*аббр. от англ. Synchronous Ethernet* – синхронного Ethernet), обеспечивающей передачу тактовых сигналов через физический уровень Ethernet, с целью предоставления сигнала синхро-

низации сетевым ресурсам [7]. Главное преимущество SyncE заключается в том, что он реализован на физическом уровне, и на него не оказывают влияния нагрузка трафика, потеря пакетов или вариация их задержки [8].

Преимущества совместной частотной и временной синхронизации

Высокая точность привязки шкалы времени и стабильность ее удержания может достигаться путем совместной реализации частотной и временной синхронизации, что играет важную роль в сценариях применения TSN. Одним из наиболее важных условий при этом выступает использование соответствующего источника шкалы времени. Таким источником может быть первичный эталонный источник времени и частоты (ПЭИВЧ) или улучшенный ПЭИВЧ (уПЭИВЧ), которые могут синхронизироваться от сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), а также отличаются повышенной точностью и устойчивостью к отказам [9]. Их появлению способствовало повышение требования к качеству синхросигналов для критически важных инфраструктур.

Так как по сравнению с ПЭИВЧ к уПЭИВЧ предъявляются более высокие требования, он дополнительно оснащен входом, на который непосредственно подключается цезиевый или водородный первичный эталонный источник (ПЭИ), он же – первичные эталонные часы (PRC, *аббр. от англ. Primary Reference Clock*) [10]. Благодаря этой функции уПЭИВЧ устойчив к длительным отключениям сигналов ГНСС и может обеспечивать точность синхронизации до 14 дней или более, используя сигнал от ПЭИ, а ПЭИВЧ не имеет такой возможности и при потере сигнала от ГНСС быстро переходит в режим удержания, что приводит к ухудшению параметров синхросигнала. Если уПЭИВЧ работает на уровне ядра сети, он обеспечивает частотную, фазовую и временную синхронизацию часов в данной сети или определенной ее части [11]. Функциональная схема уПЭИВЧ приводится на рисунке 3. При необходимости на физических интерфейсах уПЭИВЧ могут быть скомбинированы различные логические интерфейсы, на вход должен поступать сигнал от ПЭИ (слева), также он должен обеспечивать, как минимум, один выход эталонной частоты и дополнительно передавать информацию, отражающую статус часов.

Блок восстановления времени получает на вход информацию от приемника ГНСС, генерирует частоту, фазу и время. Блок локального генератора синхронизируется от ПЭИ и обеспечивает эталонную шкалу времени в блоке локальной шкалы времени. Далее на ее основе генерируется сигнал фазовой и временной синхронизации. При пропадании входного сигнала и переходе в режим удержания он должен функционировать от ПЭИ.

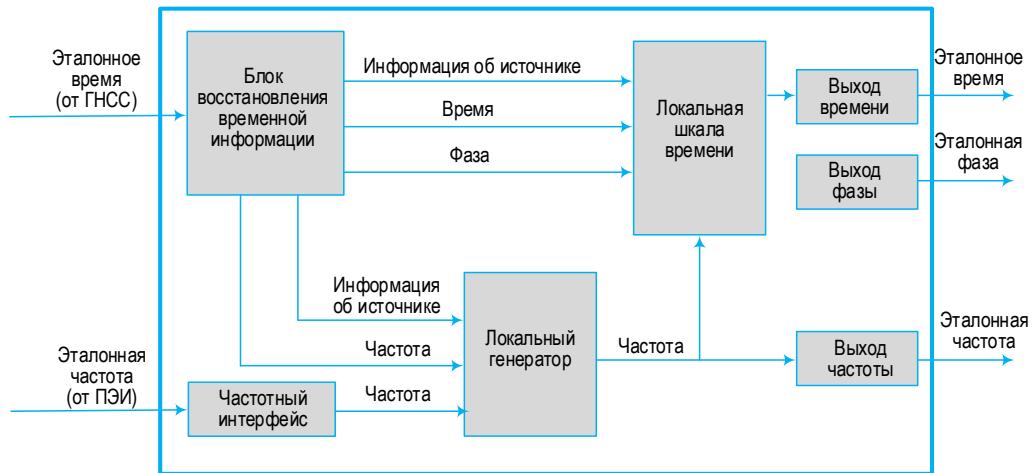


Рис. 3. Функциональная схема уПЭИВЧ
Fig. 3. Functional Diagram of the ePRTC

Для современных телекоммуникационных сетей предпочтительным вариантом обеспечения частотной, фазовой и временной синхронизации служит комбинированная модель, которая сочетает оборудование, поддерживающее технологию SyncE и работающее с PTP. Данное решение позволяет достигать более высокой точности синхронизации, чем при использовании стандартного решения на основе PTP [12]. Синхронизацию на физическом уровне обеспечивают часы PTP с высокостабильным источником частоты, получаемой от ПЭИ, что важно для повышения точности фазовой и временной синхронизации.

В оборудовании Ethernet тактовую синхронизацию обеспечивает улучшенный генератор сетевого элемента SyncE¹. Восстановление тактовой частоты ведомыми часами при использовании улучшенного генератора сетевого элемента позволяет минимизировать накопленные джиттер и вандер, вызываемые нестабильностью температуры или другими внешними условиями [13]. Восстановленная тактовая частота передается далее остальным устройствам, расположенным ниже по уровню в сети.

Топология сети, построенной по стандарту TSN, представляет собой сложную структуру, включающую множество узлов, которые взаимодействуют по принципу ведущий-ведомый. Исполнительные устройства, которые выступают потребителем синхронизации, подстраивают собственную шкалу от пересылающего экземпляра PTP, граничных часов (ВС, *аббр. от англ. Boundary Clock*), который получает сигналы синхронизации от более высокого по уровню пересылающего экземпляра PTP или непосредственно от экземпляра гроссмейстерских часов (GM, *аббр. от англ. Grandmaster* – грандмастер). Следовательно, целесообразно исследовать поведение оконечного экземпляра PTP в составе цепи синхронизации. Для этого рассмотрим простую конфигурацию, которая содержит экземпляр грандмастер, пересылающий и оконечный экземпляры PTP. На рисунке 4 показана упрощенная схема взаимодействия данных устройств.

Экземпляр грандмастер непосредственно подключен к источнику эталонной шкалы времени, которым может выступать уПЭИВЧ, и синхронизирует с ним свою шкалу. Пересылающий экземпляр PTP выступает ведущими часами для оконечного устройства, которое синхронизирует с ним свою шкалу.

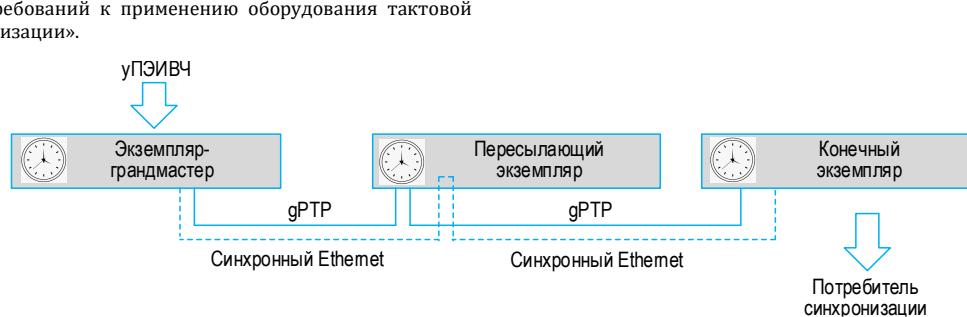


Рис. 4. Рассматриваемая схема взаимодействия
Fig. 4. The Interaction Scheme Under Consideration

Под дрейфом часов понимается величина сдвига шкалы времени в процессе работы, обусловленная относительной нестабильностью внутреннего генератора и определяемая в относительных единицах.

Имитационное моделирование временной и тактовой синхронизации

Для определения влияния тактовой синхронизации на точность привязки временной шкалы было проведено имитационное моделирование этих процессов в среде AnyLogic.

При моделировании использовались следующие ограничения и допущения:

- разрешающая способность часов (экземпляра грандмастера, пересылающего и конечного экземпляров PTP) составляет 8 нс;
- пересылающий экземпляр имеет дрейф локальных часов α_1 ;
- конечный экземпляр имеет дрейф локальных часов α_2 ;
- на сети, кроме PTP, реализуется технология SyncE, то есть поддержка частотной синхронизации;
- при использовании SyncE дрейф локальных часов снижается до $\alpha_{\text{подстр}} = 10^{-13}$;
- экземпляр грандмастера реализует циклы синхронизации с интервалом отправки сообщений T_{syncGM} , а пересылающий экземпляр обеспечивает периодичность T_{syncBC} .

Моделирование проводилось для двух ситуаций:

1) при отсутствии подстройки по частоте (SyncE):

– при фиксированных интервалах $T_{\text{syncGM}} = T_{\text{syncBC}}$, равных 10 мс, для дрейфа локальных часов $\alpha_1 = \alpha_2$, обусловленного относительной нестабильностью (точностью) генераторов 10^{-5} ($\alpha_1 = \alpha_2 = 10^{-5}$);

– при фиксированных интервалах $T_{\text{syncGM}} = T_{\text{syncBC}}$, равных 20 мс, для дрейфа $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^{-5}$;

– при фиксированных интервалах $T_{\text{syncGM}} = T_{\text{syncBC}}$, равных 20 мс, при неодинаковом дрейфе $\alpha_1 = 10^{-8}$, $\alpha_2 = 10^{-5}$, обусловленном различной нестабильностью генераторов;

– при одинаковой точности ($\alpha_1 = \alpha_2 = 10^{-8}$) и неодинаковых интервалах посылки ($T_{\text{syncGM}} < T_{\text{syncBC}}$);

2) при включении режима поддержки частотной синхронизации (для одинаковых интервалов посылки): 10, 20 и 200 мс (последнее значение – для длительных значений интервалов).

Результаты моделирования

На основании проведенного моделирования можно сказать, что при работе устройств без поддержки SyncE точность привязки локальной шкалы времени определяется относительной нестабильностью внутреннего генератора и интервала

лом посылки сообщений ведущими часами. При невысоком качестве часов пересылающего и конечного экземпляров PTP (оснащаемых генератором с нестабильностью до 1×10^{-5}) наблюдается дрейф часов относительно экземпляра грандмастера, при этом дрейф часов конечного относительно пересылающего практически отсутствует. Данное поведение одинаково для интервалов 10 и 20 мс.

Если точность генератора конечного экземпляра ниже, чем у пересылающего, то при одинаковом периоде опроса ($T_{\text{syncGM}} = T_{\text{syncBC}}$) наблюдается дрейф часов конечного относительно пересылающего экземпляра и экземпляра грандмастера, что говорит о еще большем снижении точности привязки локальной шкалы времени.

Следует заметить, что неравенство интервалов посылки сообщений, которые генерируются экземпляром грандмастера и пересылающим экземпляром оказывает влияние на процесс привязки. Если интервалы между циклами не равны, расхождение между часами пересылающего и конечного экземпляров PTP сильно возрастает до того, как пересылающий подстраивает свои часы под GM, затем конечный экземпляр начинает выравнивать свои часы, минимизируя накопленное на начальной фазе расхождение.

Если сеть поддерживает синхронизацию локальных часов по частоте, можно говорить о том, что дрейф часов практически отсутствует. Изменение интервала опроса в небольших пределах не оказывает воздействия на точность привязки, так как часы сохраняют стабильный временной интервал, в течение которого расхождение частот генераторов незначительно. Если интервалы имеют очень большую длительность, процесс подстройки выполняется аналогично, а наблюдаемое расхождение можно считать незначительным, несмотря на более продолжительный интервал корректирования часов.

Заключение

На основании произведенного моделирования можно сказать, что наличие SyncE позволяет обеспечивать высокую точность и стабильность шкалы времени, что соответствует различным интервалам между циклами синхронизации. Частотная синхронизация обеспечивает постоянство сдвига частот внутренних генераторов, что позволяет реже обмениваться синхросообщениями, в результате чего снижается нагрузка на канал передачи и, в целом, на сеть.

Если устройства в сети не поддерживают синхронизацию по частоте на физическом уровне, основным параметром, который влияет на точность привязки локальной шкалы времени, служит от-

носительная нестабильность внутреннего генератора. При невысокой точности генераторов передающего и конечного экземпляров их шкалы могут практически не различаться, но при этом сильно дрейфовать относительно GM, что неприемлемо для сети с высокими требованиями по точности синхронизации.

Следовательно, реализация частотной синхронизации в сети с поддержкой технологии TSN позволяет достигать высокой точности привязки локальной шкалы времени, при этом используя меньшее количество сообщений синхронизации. Это снижает нагрузку на сеть, минимизирует за-

держки и позволяет обеспечивать детерминированность в отношении времени передачи. Также при частотной подстройке возможно использовать менее стабильные внутренние генераторы, так как их частота постоянно корректируется, а применение данных генераторов экономически более доступно. При этом необходимо учитывать, что реализация такого подхода с технической стороны более сложна. Каждое устройство должно аппаратно поддерживать механизмы обработки физического сигнала частоты (технологию SyncE), передаваемого по всей сети.

Список источников

1. Pahlevan M. Time Sensitive Networking for Virtualized Integrated Real-Time Systems. D.Sc Dissertation. Siegen: University of Siegen, 2019. 188 p.
2. Галчихин В.И., Сторожук Н.Л., Шитников В.И. Расчет норм на показатели ошибок в действующих цифровых трактах взаимоувязанной сети связи России // Электросвязь. 2002. № 4. с. 17–20.
3. Kopetz H. Real-Time Systems, Design Principles for Distributed Embedded Applications. Cham: Springer, 2011. DOI:10.1007/b116085
4. Сторожук М.Н. Мониторинг сетевого трафика в магистральных сетях для обеспечения работы сетей TSN // Первая миля. 2022. № 3(103). С. 30–33. DOI:10.22184/2070-8963.2022.103.3.30.33. EDN:WTTPBK
5. Craciunas S.S., Oliver R.S. Out-of-sync Schedule Robustness for Time-sensitive Networks // Proceedings of the 17th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS, Linz, Austria, 09–11 June 2021). IEEE, 2021. PP. 75–82. DOI:10.1109/WFCS46889.2021.9483602
6. IEEE 802.1AS-2020. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications.
7. Воробьев А.С., Сторожук Н.Л. Тенденции развития оборудования сетевой синхронизации // Радионавигация и время: труды СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2022. № 10(18). С. 28–33. EDN:GTAMWD
8. Коган С. Сети 5G: Распределение сигналов синхронизации на сетевом оптическом транспортном уровне. Часть 2. Сетевая синхронизация по тактовой частоте // Первая миля. 2022. № 5(105) С. 44–58. DOI:10.22184/2070-8963.2022.105.5.44.58. EDN:STTKQU
9. ГОСТ Р 71148-2023. Требования по построению систем синхронизации сетей связи: сетей связи с коммутацией каналов, сетей связи с коммутацией пакетов. М.: Российский институт стандартизации, 2024.
10. Шварц М.Л., Рыжков А.В., Аладин В.М. Перспективный первичный эталон времени и частоты для систем частотно-временного обеспечения сетей связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 8. С. 12–20. DOI:10.36724/2072-8735-2022-16-8-12-20. EDN:GFOETJ
11. Chowdhury D. NextGen Network Synchronization. Cham: Springer, 2018. 269 p. DOI:10.1007/978-3-030-71179-5
12. Menendez Y. Improving synchronization accuracy with help from SyncE. URL: <https://www.nokia.com/blog/improving-synchronization-accuracy-with-help-from-syncE> (Accessed 30.01.2025)
13. Рекомендация МСЭ-Т G.8262/Y.1362 Характеристики хронирования ведомых тактовых генераторов оборудования синхронного Ethernet. 2015.

References

1. Pahlevan M. Time Sensitive Networking for Virtualized Integrated Real-Time Systems. D.Sc Dissertation. Siegen: University of Siegen; 2019. 188 p.
2. Galchikhin V.I., Storozhuk N.L., Shitnikov V.I. Calculation of Standards for Error Indicators in Existing Digital Paths of the Interconnected Communication Network of Russia. *Electrosvyaz*. 2002;4:17–20. (in Russ.)
3. Kopetz H. Real-Time Systems, Design Principles for Distributed Embedded Applications. Cham: Springer; 2011. DOI:10.1007/b116085
4. Storozhuk M. Network Traffic Monitoring in Backbone Networks to Ensure the TSN Networks Operation. *Last Mile*. 2022;3(103):30–33. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2022.103.3.30.33. EDN:WTTPBK
5. Craciunas S.S., Oliver R.S. Out-of-sync Schedule Robustness for Time-sensitive Networks. *Proceedings of the 17th International Conference on Factory Communication Systems, WFCS, 09–11 June 2021, Linz, Austria*. IEEE; 2021. p.75–82. DOI:10.1109/WFCS46889.2021.9483602
6. IEEE 802.1AS-2020. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications.

7. Vorobyov A.S., Storozhuk N.L. Trends in the Development of Network Synchronization Equipment. *Radionavigaciya i vremya: trudy SZRC Koncerna VKO «Almaz – Antej»*. 2022;10(18):28–33. (in Russ.) EDN:GTAMWD
8. Kogan S. 5G Networks: Timing Signal Distribution at the Optical Transport Layer. Part 2. Clock-Based Network Synchronization. *Last Mile*. 2022;5(105):44–58. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2022.105.5.44.58. EDN:STTKQU
9. GOST R 71148-2023. *Requirements for the construction of synchronization systems of communication networks: circuit-switched communication networks, packet-switched communication networks*. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ.; 2024. (in Russ.)
10. Shvarts M.L., Ryzhkov A.V., Aladin V.M. Perspective Primary Standard of Time and Frequency for Frequency Systems and Time Support of Communication Networks. *T-Comm*. 2022;16(8):12–20. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2022-16-8-12-20. EDN:GFOETJ
11. Chowdhury D. *NextGen Network Synchronization*. Cham: Springer; 2018. 269 p. DOI:10.1007/978-3-030-71179-5
12. Menendez Y. *Improving synchronization accuracy with help from SyncE*. URL: <https://www.nokia.com/blog/improving-synchronization-accuracy-with-help-from-syncE> [Accessed 30.01.2025]
13. Rec. ITU-T G.8262/Y.1362 *Timing characteristics of synchronous Ethernet equipment slave clock*. 2015.

Статья поступила в редакцию 14.11.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025; принята к публикации 19.12.2025.

The article was submitted 14.11.2025; approved after reviewing 16.12.2025; accepted for publication 19.12.2025.

Информация об авторе:

**СТОРОЖУК
Николай Леонидович** кандидат технических наук, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0005-7463-502X>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.