

# Технические и методологические решения по распределению сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи с подключением киберфизических систем

Н.В. Чикалов, К.З. Билятдинов

**Аннотация** – При построении современной и будущей телекоммуникационной гетерогенной сети, в которой совместно работают киберфизические системы, устройства Интернета вещей (в том числе и промышленного) и классические системы связи, важную роль выполняют сети тактовой синхронизации (ТСС) и сети временной синхронизации (ВСС), которые позволяют за счет согласования шкал частот и шкал времени избежать или свести к минимуму потери информации, рассогласование функционирования исполнительных механизмов. Невозможно построить современную и будущую гетерогенную сеть связи с гарантированно высоким качеством обслуживания абонентов и конечных устройств без правильно организованных ТСС и ВСС, которые представляют собой технические средства, обеспечивающие формирование, передачу сигналов, контроль качества выдаваемых сигналов, контроль сети передачи сигналов синхронизации.

**Ключевые слова** — киберфизические системы, гетерогенные сети связи, временная синхронизация, частотная синхронизация, интернет вещей

## I ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительного роста числа подключенных устройств, таких как сенсоры, исполнительные механизмы и другие компоненты Интернета вещей и киберфизических систем, автономных систем (беспилотные транспортные средства, беспилотные летательные аппараты) синхронизация (частотная, фазовая, временная) становится одной из ключевых задач, требующей решения для обеспечения надежной и эффективной их работы. В сетях нового поколения, в промышленных и высокопроизводительных системах точная синхронизация времени критически важна для поддержания согласованности между устройствами, управления процессами реального времени [1,2].

Единое время позволяет устройствам синхронизировать периоды активности и оптимизировать передачу данных, что важно для

снижения нагрузки на сеть. В таких отраслях, как телекоммуникации, энергетика и транспорт, точное время крайне необходимо для работы приложений реального времени, где малейшие временные отклонения могут привести к серьезным сбоям или ошибкам в данных. Например, в сетях 5G и системах автоматического управления транспортом единое точное время обеспечивает координацию различных компонентов, таких как базовые станции, датчики, исполнительные механизмы, автономные системы. Таким образом, наличие точного единого времени в гетерогенных сетях связи является фундаментальным требованием для их стабильного и эффективного функционирования, особенно в условиях высокой плотности устройств и разнородной сетевой инфраструктуры [3].

Учитывая тот факт, что КФС находится на заре внедрения в широкое пользование, то можно обозначить проблему, которая заключается в обеспечении точной и устойчивой синхронизации в условиях разнородной инфраструктуры (инфраструктуры, присущей классическим сетям связи и инфраструктуры, присущей будущим гетерогенным сетям связи). Настоящая работа направлена на поиск решения такой проблемы.

Актуальность исследования подкрепляется тем, что совершенствование систем связи, устройств для систем связи способствует реализации Указа Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», одна из целей которого состоит в том, чтобы обеспечить ускоренное внедрение цифровых технологий в экономике и информационной инфраструктуре [4,5].

Ускоренное внедрение моделей, методик, алгоритмов разрабатываемых в рамках настоящей работы, создаст условия для высокотехнологичного бизнеса, повысит конкурентоспособность страны на глобальном рынке, укрепит национальную безопасность и повысит качество функционирования современных и перспективных сетей и систем связи.

Рассматриваемые направления развития систем частотно-временного обеспечения (ЧВО) для гетерогенных сетей связи позволит также создать почву для формирования новых научных школ, прикладных областей с целью обеспечения совершенного иного качественного уровня предоставления услуг в гетерогенных сетях связи.

Статья получена 14 декабря 2024 г.

Н.В. Чикалов, старший инженер-программист АО «НИИ «Рубин»  
(n.v.chikalov@rubin-spb.ru)

К.З. Билятдинов, к.в.н., д.т.н. профессор кафедры системного анализа и управления Государственного университета «Дубна»(k.bilyatdinov@mashtab.org)

## II ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ключевой особенностью современного этапа развития сетей является необходимость обеспечения высокой точности и стабильности синхронизации. Это особенно важно для новых поколений сетей (5G и 6G, гетерогенные сети с подключение киберфизических систем), где точность временной синхронизации имеет решающее значение для таких приложений, как автономное управление транспортом, сложные распределённые промышленные системы и системы Интернета вещей, требующие обеспечения функционирования в условиях жесткого реального времени (десятки, единицы наносекунд).

Отличительные требования для гетерогенных сетей связи с подключением КФС можно сформулировать следующим образом:

1) возросшая точность предоставления сигналов синхронизации (Требование возникает вследствие того, что КФС представляют собой большие сложные технические системы, которые функционируют в режиме жесткого реального времени.);

2) учет специфических протоколов и интерфейсов, присущих КФС, устройствам Интернета вещей (в том числе и промышленного) (Требование возникает вследствие того, что современные устройства имеют свои интерфейсы связи и не всегда совместимы с классическими интерфейсами оборудования систем ЧВО.);

3) распределение сигналов синхронизации в условиях сложной топологии сети (Требование возникает вследствие того, что современные и будущие сети связи обладают повышенной плотностью устройств, которым необходима синхронизация.);

4) учет динамического характера построения гетерогенной сети связи с подключением КФС (Требование возникает вследствие того, что некоторые устройства КФС и IoT (IIoT) имеют свойство автономности – BTS, БЛА.).

Рассмотрим классические сети синхронизации, которые делятся на два типа: сети тактовой синхронизации и сети временной синхронизации.

**Тактовая сетевая синхронизация (ТСС)** — это процесс согласования частотных характеристик всех устройств в телекоммуникационной или распределённой сети на основе единого эталонного источника частоты. Цель ТСС — поддержание согласованной работы всех узлов, предотвращение накопления фазовых ошибок и исключение дрейфа частоты, который может приводить к потере данных или снижению качества обслуживания.

ТСС позволяет каждому устройству в сети функционировать в строгом тактовом режиме, ориентируясь на высокостабильные тактовые сигналы. Основным принципом работы ТСС является использование иерархии тактовых генераторов: первичных эталонных генераторов на верхнем уровне (с применением атомных часов и/или GPS-приемников) и вторичных задающих генераторов (ВЗГ), поддерживающих фазу и частоту в случае потери основного сигнала.

На рисунке представлена структура ТСС:

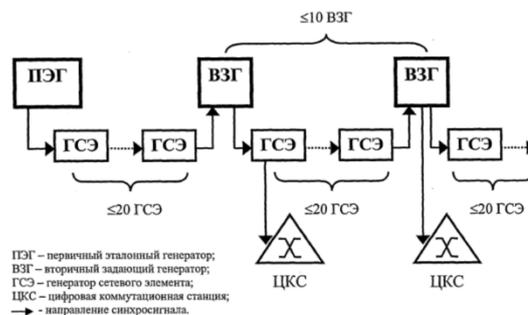


Рисунок 1 – структура ТСС

**Временная сетевая синхронизация (ВСС)** — это процесс согласования точного времени между узлами и устройствами в распределённой сети для обеспечения синхронного выполнения операций и передачи данных с минимальными временными отклонениями. Временная синхронизация позволяет каждому элементу сети работать в единой временной шкале, поддерживая абсолютное время в формате мировых стандартов, таких как UTC.

На рисунке 2 представлена структура ВСС:

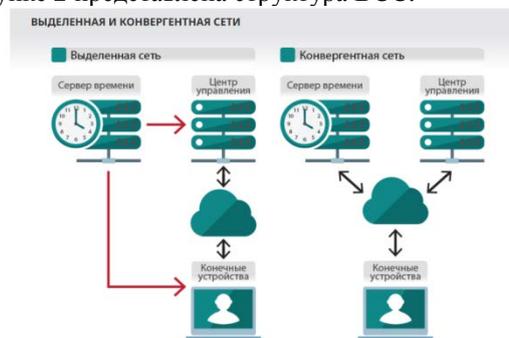


Рисунок 2 – структура ВСС

Синхронизация времени в сетях связи необходима для согласования работы устройств и приложений, осуществляющих обработку данных в режиме реального времени. Помимо этого, синхронизация требуется в системах мониторинга и управления с целью протоколирования возникающих событий и своевременного реагирования на них.

Главная задача организации сети синхронизации точного единого времени заключается в обеспечении согласованного функционирования всех устройств и узлов в сети. В отличие от тактовой синхронизации, здесь важно не только синхронизировать частоту, но и фазу, т.е. все устройства должны иметь одинаковое представление о текущем времени и времени начала каждой секунды с высокой точностью. Это очень важно для приложений, требующих временных меток или синхронных операций, таких как системы управления энергосетями, распределенные системы управления и системы реального времени, беспилотные технологии.

Точные временные метки необходимы для координации множества процессов, начиная с анализа данных сенсоров и заканчивая распределением вычислительных задач в сети. Например, в системах автономного транспорта и автоматизированного производства любые отклонения в синхронизации могут привести к аварийным ситуациям или к снижению производительности.

Современные методы синхронизации (тактовая и временная) предлагают различные подходы к

синхронизации, обеспечивая разный уровень точности в зависимости от архитектуры сети и требований к производительности. Однако с увеличением плотности подключенных устройств, в том числе киберфизических устройств и устройств Интернета вещей, с усложнением топологии сети, возникновением гетерогенных процессов в сетях связи эти методы сталкиваются с рядом проблем, таких как масштабируемость, задержки передачи данных, ограниченная пропускная способность, возросшие требования к точности временных меток, функционирование в условиях высокой плотности устройств.

Гетерогенные сети связи с подключением киберфизических систем являются основой современного и будущего цифрового общества. Модели, структуры, устройства систем ЧВО должны эволюционировать в сторону повышения точности синхронизации, гибкости предоставления синхросигналов и сигналов единого времени конечным устройствам, устойчивости и надежности предоставления сигналов синхронизации. Будущие исследования и разработки должны быть направлены на эффективное сочетание преимуществ различных технологий и подходов, удовлетворяя растущие потребности пользователей, устройств и поддерживая работу сложных распределённых систем реального времени.

В таблице 1 представлено сравнение методов синхронизации, используемых в ТСС и ВСС [6].

Таблица 1

| Метод                          | Вид                           | Преимущества                 | Недостатки  | Точность |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|----------|
| GNSS                           | Частотная, фазовая, временная | Не зависит от нагрузки сети. | Обязательная установка антенны. Невозможность использования в закрытых помещениях. Возможные помехи от других радиоустройств. Резервирование предоставляется только установкой второго приемника GNSS | < 1мкс   |
| Тактовая сетевая синхронизация | Частотная, фазовая            | Не зависит от нагрузки сети. | Чем больше цифровая сеть, а следовательно, и сеть ТСС, тем больше элементов, содержащих внутренние генераторы, которые вносят свои коррективы в общий фон работы сети. Цифровые сети постоянно        | < 1мкс   |

|               |                               |  |   |               |
|---------------|-------------------------------|--|---|---------------|
|               |                               |  | растут и развиваются, их структура становится всё сложнее. Сигналы синхронизации из-за неправильного проектирования основного и резервного направления могут образовывать петли по синхронизации. |               |
| Sync Ethernet | Частотная                     | Не зависит от нагрузки сети. Схожесть с сетью SDH            | Предоставляет только частотную синхронизацию. Необходима поддержка SyncEthernet всеми элементами сети   | < 1мкс        |
| NTP           | Временная                     | Широкое распространение, гибкость и легкость внедрения       | Зависит от нагрузки сети  | 0,5 - 100 мс  |
| SNTP          | Временная                     | Упрощенная версия NTP, легкость внедрения.                   | Зависит от нагрузки сети..  | 10 - 100 мс   |
| IRIG-B        | Частотная, фазовая, временная | Не зависит от нагрузки сети.                                 | Распространен в основном в промышленных сетях энергетических объектов   | 10 мкс - 1 мс |
| PTP           | Временная, Частотная, фазовая | Предоставление частотной, фазовой и временной синхронизации. | Зависит от загрузки сети. Специфическая аппаратная реализация   | < 1мкс        |
| White Rabbit  | Временная, Частотная, фазовая | Предоставление частотной, фазовой и временной синхронизации. | Специфическая аппаратная реализация, цена, сложность реализации   | < 0,1 мкс     |

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, которые приведены в таблице. Чтобы определить правильный подход при построении сети синхронизации, рекомендуется учитывать много критериев, которые специфичны для различных сетей [7].

Как показывают данные таблицы 1, с развитием сетей связи возрастают требования к точности, надёжности синхронизации, появляются запросы на модернизацию методов синхронизации, что обуславливает развитие системы синхросигналов и усложнение её структуры. В настоящее время наблюдается тенденция на внедрение технологий Интернета вещей, киберфизических систем, беспилотных систем, технологии граничных

вычислений, которые содержат большое количество устройств с протоколами и интерфейсами исторически присущими данному классу устройств. Следовательно, возникает потребность в рассмотрении новых методов синхронизации для таких сетей с учетом архитектур и особенностей их построения. Разработка методов, моделей, алгоритмов, структур сетей синхронизации для таких систем требует инновационных решений.

Сравнение существующих методов синхронизации и анализ требований к гетерогенным сетям связи с подключением КФС показывают, что для гетерогенных сетей с подключением киберфизических систем требуется комплексный подход, сочетающий гибкость пакетных технологий с высокой точностью тактовых технологий.

Важно отметить, что существующих технологических решений в области синхронизации оборудования уже недостаточно для удовлетворения возросших требований, предъявляемых к современным высокоплотным, гетерогенным, киберфизическим сетям связи. Поэтому должна вестись активная работа по созданию новых отечественных стандартов в сфере синхронизации и частотно-временного обеспечения как на уровне рекомендаций и нормативных документов, так и на уровне создания новых типов оборудования.

Отечественные наработки в этой области создают основу для внедрения новых технологий ЧВО и могут быть использованы для разработки новых устройств систем синхронизации связи. Однако для этого требуется существенное обновление отечественной нормативно-правовой базы и подходов к проектированию и строительству перспективных систем связи.

Предлагаемые в рамках настоящей работы рекомендации, основанные на интеграции современных стандартов и инновационных технологиях, позволят обеспечить надёжность и точность синхронизации для широкого спектра киберфизических приложений, от умных городов до промышленного IoT.

Учитывая все вышесказанное, можно сформулировать актуальные задачи исследования:

- 1) разработка методологического подхода распределения сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи;
- 2) разработка технических решений для распределения сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи.

В основу исследования положена гипотеза о эффективном распределении сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи, которое может быть достигнуто за счёт интеграции адаптивных алгоритмов управления с использованием гибридных методов, объединяющих классические методы распределения сигналов синхронизации с технологиями, присущими КФС и IoT (IIoT).

### III МЕТОДОЛОГИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ СИНХРОНИЗАЦИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Принимая во внимание тот факт, что существующих технологических решений уже не хватает, для того чтобы справиться с задачами, поставленными перед перспективными гетерогенными сетями связи, уже

сейчас разработчикам систем синхронизации следует начинать взаимодействовать с разработчиками киберфизических систем для выработки единой стратегии синхронизации больших сложных технических систем.

Системный подход при разработке устройств и систем синхронизации для гетерогенных сетей связи заключается в комплексном рассмотрении всех компонентов, взаимодействий и требований системы как единого целого.

Методологические решения должны учитывать разнородность гетерогенных сетей связи, требования киберфизических систем и ограничения инфраструктуры.

**Методология распределения сигналов синхронизации** представляет собой последовательность научно-обоснованных подходов, методов и процедур, направленных на обеспечение точности, надёжности и эффективности передачи сигналов временной и частотной синхронизации в гетерогенных сетях связи.

#### **Определение требований к синхронизации.**

Необходимо проработать требования к точности, с которой передаются временные метки. Киберфизические системы в гетерогенных сетях связи представляют собой огромный класс устройств, которые выполняют совершенно разные задачи. Так, например, для БТС и БЛА необходимы точности установки внутренних шкал частот менее  $1 \cdot 10^{-6}$  и шкал времени менее 1 мкс. Это связано с тем, что данные устройства являются сложными техническими системами, функционирующими в режиме жесткого реального времени.

#### **Построение архитектуры распределения сигналов синхронизации.**

Во-первых, необходимо рассмотреть модели распространения синхросигналов по гетерогенной сети связи. Несомненно, что данная модель, также как и классические ТСС и ВСС, будет иерархической – опорные сигналы будут формироваться в PRC и распространяться вниз к периферийным узлам. Однако необходимо будет проработать вопрос о допустимом количестве транзитных переходов, после которых качество сигнала будет недопустимым для использования в целях синхронизации конечных устройств.

Во-вторых, надо уделить особое внимание резервированию ведущих устройств и маршрутов для обеспечения требуемого уровня надежности.

#### **Моделирование процессов распределения синхронизации.**

Во-первых, необходима разработка адекватных математических моделей для анализа влияния задержек, джиттеров, асимметричных составляющих сети связи для оценки точности синхронизации в гетерогенных сетях связи.

Во-вторых, необходима разработка сетевых симуляторов, в которых виртуально можно оценить качество предлагаемых решений.

В-третьих, необходима проверка критических сценариев для тестирования работы сети синхронизации для гетерогенных сетей связи при сбоях опорного источника синхронизации или увеличении нагрузки.

### **Разработка алгоритмов управления синхронизацией в гетерогенных сетях связи.**

Нельзя не учитывать тот факт, что с каждым годом сети связи все больше усложняют свои топологии. Из чего следует, что необходимо использовать подходы, основывающиеся на адаптивном построении маршрутов распределения сигналов синхронизации (актуально для ВСС). Таким образом, применение искусственного интеллекта позволит повысить эффективность работы сети синхронизации для гетерогенных сетей связи.

#### **Периферийные интерфейсы.**

Будет требоваться либо новый класс оборудования синхронизации, либо модернизация уже имеющегося оборудования под интерфейсы, присущие киберфизическим системам. Так, например, БТС и БЛА, не имеющие проводного канала связи, должны иметь беспроводной канал связи получения синхросигналов, а, следовательно, необходимо провести исследования, по точности распределения сигналов синхронизации с использованием радиоканалов.

Методология распределения сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи с подключением киберфизических систем должна обеспечивать комплексный подход к проектированию, тестированию и управлению как устройствами синхронизации, так и устройствами, которые являются потребителями данных сигналов. Адекватный методологический подход позволит создавать надёжные, точные и масштабируемые системы, соответствующие требованиям современных и будущих телекоммуникаций с интегрированными в них киберфизическими системами.

### **IV ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ СИГНАЛОВ СИНХРОНИЗАЦИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ**

Построение сети синхронизации гетерогенной сети связи с подключением киберфизических систем может основываться на следующих технических решениях:

1) **Резервирование.** Получение сигналов синхронизации не всегда возможно по одному единственному каналу синхронизации, поэтому конечные устройства должны иметь резервные входы для опорных сигналов (например, GNSS/PTP/SyncE).

2) **Программно-конфигурируемые сети (ПКС).** ПКС являются перспективной технологией для управления сложными сетями. Гетерогенные сети связи с подключением киберфизических устройств как раз являются сетями со сложной топологией, а значит необходимо рассмотреть вопрос применения централизованного программного управления для обеспечения гибкости конфигурации и динамической адаптации к изменениям в топологии сети. ПКС позволяет централизованно управлять всеми компонентами сети временной синхронизации через центральный контроллер, что может упростить распределение сигналов синхронизации. Также применение данной технологии позволит перенаправлять потоки синхронизации в обход проблемных участков сети по другому оптимальному маршруту, что в свою очередь может повысить надежность и устойчивость сети временной синхронизации для гетерогенных сетей связи с

подключением КФС. Стоит отметить, что технология ПКС позволяет легко масштабировать сеть при добавлении новых узлов связи. Особенно важно применять данную технологию в переходный момент времени, который наблюдаем сейчас, когда не все промежуточные узлы поддерживают профиль PTP и могут вносить асимметричные задержки, а следовательно, пакеты с сигналами синхронизации могут проходить не по наилучшему маршруту.

3) **Искусственный интеллект.** В рамках концепции ПКС возможно использование методов машинного обучения для прогнозирования нагрузки на сервера единого времени и перераспределения запросов внутри сети временной синхронизации.

4) **Беспроводные каналы.** Использование беспроводных оптических каналов распределения сигналов синхронизации может положительно сказаться на передаче меток времени между узлами связи в условиях сложной помеховой обстановки (например, защитное зашумление). Однако стоит учитывать, что беспроводные оптические каналы связи обычно имеют ограничения на расстояние передачи - около 1-1,5 км. Поэтому использование данных систем может быть целесообразно в пределах небольшой распределенной подсети.

5) **Протоколы.** Для киберфизических приложений необходимо рассмотреть упрощенные протоколы синхронизации, например SPTP (по аналогии с SNTP) для того чтобы обеспечить устойчивое функционирование устройств с учетом их архитектур.

6) **Интерфейсы.** Для киберфизических приложений также следует учитывать их аппаратную архитектуру с целью рассмотрения возможных новых физических каналов связи для распределения сигналов синхронизации.

7) **Безопасность.** Использование шифрования благоприятно скажется на передаче меток времени, благодаря защите от подмены злоумышленниками точного времени. Однако стоит учитывать, что процесс шифрования на передающей стороне и расшифрования на приемной стороне должен быть строго детерминирован, а именно занимать строго отведенное время во избежание появления асинхронных задержек, отрицательно влияющих на процесс синхронизации ведомых и ведущих часов;

8) **Профили PTP.** Будущие гетерогенные сети связи будут функционировать в сетях 5G и 6G, которые характеризуются более высокими скоростями и более жесткими требованиями к задержкам, джиттерам и точности установки единого времени, а следовательно уже сейчас необходимо прорабатывать новые профили PTP для более эффективного функционирования устройств в таких сетях связи.

Предложенные технические решения направлены на повышение надежности, устойчивости и эффективности сетей синхронизации для гетерогенных сетей связи с подключением киберфизических систем.

### **V ОБЛАСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Развитие Интернета вещей, гетерогенных сетей связи, киберфизических систем демонстрирует стремительное увеличение числа подключённых устройств, количество которых уже вдвое превысило численность населения

Земли [8]. По прогнозам специалистов к 2030 году количество «умных устройств» достигнет 30–40 миллиардов – устройства в крупных промышленных сетях, устройства в сети Интернета вещей, БТС и БЛА, а также устройства нового перспективного направления «Умная пыль» [9, 10]. График роста количества подключенных устройств представлен на рисунке:

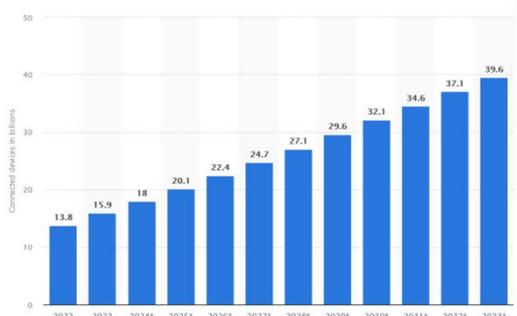


Рисунок 3 – рост количества подключенных устройств в мире

«Умная пыль» – сеть, построенная по принципу mesh-топологии, состоящая из огромного количества миниатюрных устройств, которые включают в себя вычислительную компоненту, беспроводной передатчик (ZigBee или BLE), сенсоры для сбора информации.

Технологии «умной пыли» уже находят применение в различных областях:

- **сельское хозяйство:** в Калифорнии «умная пыль» используется для мониторинга микроклимата виноградников, фиксируя такие параметры как влажность, температура и содержание углекислого газа. Эти данные помогают оптимизировать процесс орошения и ухода за растениями.

- **строительство и инфраструктура:** «Умная пыль» применяется для наблюдения за состоянием мостов и зданий, обеспечивая раннее предупреждение о возможных повреждениях.

- **медицина:** микросенсоры исследуются для диагностики состояния органов. В одном из экспериментов устройства обнаруживали изменения в дыхательных путях пациентов с астмой.

- **космические исследования:** NASA рассматривает возможность использования «умной пыли» для изучения поверхности Марса или поиска жизни на спутниках Юпитера.

Перспективы технологии «умной пыли» могут стать основой для внедрения автономных систем контроля, диагностики и анализа и в других отраслях, кроме перечисленных: «умные города», промышленность, военные системы и т.д. Благодаря непрерывному совершенствованию их размеров, энергоэффективности и функциональности эти устройства готовы интегрироваться в сложные распределённые системы, что открывает новые горизонты для IoT и технологий будущего.

Вышесказанное только подтверждает необходимость развития новых сетей синхронизации, так как появляются новые гетерогенные сети связи, устройства которых также нуждаются в единой частотной и временной шкалах для обеспечения согласованного

функционирования.

## VI ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей статьи была рассмотрена актуальная тема – проблема синхронизации в гетерогенных сетях с подключением киберфизических систем. Обоснована актуальность и поставлены цели и задачи.

Развитие гетерогенных сетей связи с высокоплотной интеграцией киберфизических систем предъявляет всё более строгие требования к системам синхронизации.

Авторами предложены методологическое и техническое решения выявленной проблемы, а также рассмотрена потенциальная область практического применения.

Внедрение предложенных решений на практике откроет новые возможности для повышения эффективности, производительности и надёжности сетей связи, что особенно важно для перспективных технологий систем и сетей связи.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1 Рыжков А.В., Шварц М.Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования – основы сквозных цифровых технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Том 15, №7. – С. 14-22.

2 Шварц М.Л., Рыжков А.В. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От псевдосинхронных до когерентных сетей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. -2021. -№4 -С. 27-38

3 Колтунов М.Н., Леготин Н.Н., Шварц М.Л. Сетевая синхронизация. – М.: SYRUSSYSTEMS, 2007. – 240 с.

4 Постановление Правительства РФ от 30.03.2021 № 479 "Об утверждении государственной программы РФ "Цифровая экономика". – Режим доступа: <https://base.garant.ru/71937200/> (дата обращения: 29.11.2024).

5 Указ Президента РФ от 10.07.2018 № 204 "О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года". – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45726> (дата обращения: 29.11.2024).

6 Синхронизация точного времени: стандарт IEEE 1588 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://moxa.ru/tehnologii/power\\_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/](https://moxa.ru/tehnologii/power_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/) (дата обращения: 29.11.2024).

7 Синхронизация в сетях нового поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya\\_v\\_setyah\\_novogo\\_pokoleniya](https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya_v_setyah_novogo_pokoleniya) (дата обращения: 29.11.2024).

8 Statista. Number of IoT-connected devices worldwide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (дата обращения: 29.11.2024).

9 DustNetworks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dust\\_Networks](https://en.wikipedia.org/wiki/Dust_Networks) (дата обращения: 29.09.2024).

10 Levis, P., Culler, D. TinyOS: An Operating System for Wireless Sensor Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://people.eecs.berkeley.edu/~culler/AIPT/papers/TinyOS/levis06tinyos.pdf> (дата обращения: 29.11.2024).

# Technical and methodological solutions for the distribution of synchronization signals in heterogeneous communication networks with the connection of cyber-physical

Nikita Chikalov, Kamil Bilyatdinov

**Abstract** – When building a modern and future heterogeneous telecommunication network, in which cyber-physical systems, Internet of Things devices (including industrial ones) and classical communication systems operate together, an important role is played by clock synchronization networks (CSN) and time synchronization networks (TSN), which allow, by coordinating frequency scales and time scales, to avoid or minimize information loss, mismatch in the functioning of actuators. It is impossible to build a modern and future heterogeneous communication network with a guaranteed high quality of service for subscribers and end devices without properly organized CSN and TSN, which are technical means that ensure the formation, transmission of signals, quality control of the issued signals, and control of the synchronization signal transmission network.

**Keywords** - cyber-physical systems, heterogeneous communication networks, time synchronization, frequency synchronization, Internet of things

## REFERENCES

- 1 Ryzhkov A.V., Schwartz M.L. Prerequisites for the creation of a coherent public communication network - the foundations of end-to-end digital technologies // T-Comm: Telecommunications and transport. - 2021. - Vol. 15, No. 7. - P. 14-22.
- 2 Schwartz M.L., Ryzhkov A.V. Modern trends in the development of network synchronization systems in telecommunication networks. From plesiochronous to coherent networks // Systems for synchronization, signal generation and processing. - 2021. - No. 4 - P. 27-38
- 3 Koltunov M.N., Legotin N.N., Schwartz M.L. Network synchronization. - M.: SYRUS SYSTEMS, 2007. - 240 p.
- 4 Resolution of the Government of the Russian Federation of 30.03.2021 No. 479 "On approval of the state program of the Russian Federation 'Digital Economy'". - Access mode: <https://base.garant.ru/71937200/> (date of access: 29.11.2024).
- 5 Decree of the President of the Russian Federation of 10.07.2018 No. 204 "On national goals and strategic objectives for the development of the Russian Federation through 2024". - Access mode: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45726> (date of access: 29.11.2024).
- 6 Synchronization of exact time: IEEE 1588 standard [Electronic resource]. - Access mode: [https://moxa.ru/tehnologii/power\\_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/](https://moxa.ru/tehnologii/power_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/) (date of access: 29.11.2024).
- 7 Synchronization in new generation networks [Electronic resource]. - Access mode: [https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya\\_v\\_setyah\\_novogo\\_pokoleniya](https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya_v_setyah_novogo_pokoleniya) (date of access: 29.11.2024).
- 8 Statista. Number of IoT-connected devices worldwide [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (date of access: 29.11.2024).
- 9 Dust Networks [Electronic resource]. - Access mode: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dust\\_Networks](https://en.wikipedia.org/wiki/Dust_Networks) (date of access: 09/29/2024).
- 10 Levis, P., Culler, D. TinyOS: An Operating System for Wireless Sensor Networks [Electronic resource]. - Access mode: <https://people.eecs.berkeley.edu/~culler/AIIT/papers/TinyOS/levis06tinyos.pdf> (date of access: 11/29/2024).

Nikita Chikalov, Senior Software Engineer of "Scientific Research Institute "Rubin", St. Petersburg, Russia (n.v.chikalov@rubin-spb.ru)  
Kamil Bilyatdinov, PhD (Technical Science), Professor of Dubna State University, St. Petersburg, Russia (k.bilyatdinov@mashtab.org)