

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <https://www.agequal.ru>

2025, №1 https://www.agequal.ru/pdf/2025/AGE_QUALITY_1_2025.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Чикалов Н.В., Билятдинов К.З. О разработке моделей систем распределения сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи с подключением киберфизических систем // Электронный научный журнал «Век качества». 2025. №1. С. 170-180. Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2025/125011.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 004.716

**О разработке моделей систем распределения сигналов синхронизации
в гетерогенных сетях связи с подключением киберфизических систем**

Чикалов Никита Вячеславович,
*старший инженер-программист
отдела разработки программного обеспечения АО «НИИ «Рубин»
194100, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская 5,
n.v.chikalov@rubin-spb.ru*

Билятдинов Камиль Закирович,
*доктор технических наук, кандидат военных наук,
профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А,
k74b@mail.ru*

В статье представлены научно-методологические подходы к разработке моделей, методик и алгоритмов синхронизации для гетерогенных сетей связи с подключением киберфизических систем: Интернет вещей, промышленный Интернет вещей, беспилотные системы, системы типа «умный город». Решается актуальная задача функционирования данных систем по поддержанию единой временной шкалы для обеспечения согласованной работы всех компонентов гетерогенной сети связи в режиме реального времени.

Разработку моделей предлагается осуществлять на основе анализа и систематизации требований, обусловленных спецификой функционирования таких сетей, включая обеспечение заданной точности временной, фазовой и частотной синхронизации, адаптации к асимметричным задержкам при передаче данных, учёта динамических изменений топологии сети, присущих современным и будущим сетям связи, а также анализа требований к конкретной киберфизической системе.

В будущем практическая значимость разработки моделей будет усиливаться по мере развития инфокоммуникационных технологий.

Ключевые слова: киберфизические системы, гетерогенные сети связи, стандарты синхронизации, частотно-временное обеспечение.

Введение

В современных условиях ключевой задачей развития и совершенствования информационных технологий выступает повышение эффективности и устойчивости функционирования гетерогенных сетей связи, имеющих в своем составе в качестве конечных устройств киберфизические системы.

Вот почему сегодня усиливается актуальность разработки моделей, методик и алгоритмов устройств синхронизации на основе частотно-временного обеспечения (ЧВО), предназначенных для обеспечения функционирования гетерогенных сетей связи с подключением киберфизических систем.

Адекватность требований к устройствам ЧВО, обоснованный выбор моделей, алгоритмов, методик позволят создавать сети связи, которые соответствуют современным требованиям синхронизации в гетерогенных инфраструктурах. Такие сети обеспечат точность временной координации, надёжность передачи данных и совместимость различных технологий. Это, в свою очередь, будет способствовать эффективному развитию высокотехнологичных систем связи и автоматизации.

Анализ современных научных исследований в области разработки и эксплуатации систем и устройств синхронизации и повышения эффективности функционирования устройств ЧВО в инфокоммуникационных системах [1-9] показывает, что существуют определённые пробелы в научно-методологическом базисе, применимом для выбора и эксплуатации современных киберфизических систем в составе гетерогенной сети связи.

В связи с этим возникла необходимость решения актуальной задачи исследования, заключающейся в формировании научно-методологических

основ для разработки моделей системы распределения сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи с подключением киберфизических систем (далее – Модели).

Основная часть

В результате анализа результатов научных исследований [2-9], требований к управлению, трендов развития инфотелекоммуникационных технологий и основных характеристик киберфизических систем установлено, что предлагаемые научно-методологические основы для разработки Моделей должны включать в себя:

I. Требования к Моделям.

1. Модели должны быть применимы для повышения эффективности проектирования, развития и модернизации специализированных и технологических сетей связи, а именно, сети временной и тактовой синхронизации.

Требование особенно актуально для гетерогенных сетей связи, функционирующих в интересах управления сложными высокотехнологичными системами. Реализация такого подхода позволит улучшить координацию компонентов, повысить производительность и устойчивость работы всей инфраструктуры.

2. В Моделях применение устройств ЧВО в конкретных сетях связи для повышения эффективности управления киберфизическими системами должно определяться состоянием и параметрами функционирования сетевой инфраструктуры.

В этом требовании ключевую роль играет способность сетей связи предоставлять услуги, полностью соответствующие специфическим требованиям киберфизических систем.

3. Модели должны обеспечивать требуемую надёжность и качество обработки данных.

Данное требование будет особенно актуально в контексте выполнения норм и стандартов (отечественных и международных), установленных действующим законодательством в области связи.

4. Модели должны учитывать возможности средств связи, включая их адаптацию к разнородной инфраструктуре и способность интегрироваться с различными компонентами сети для обеспечения согласованности в работе всех компонентов сети.

5. Для достижения высокой эффективности при разработке устройств синхронизации для гетерогенных сетей связи в Моделях требуется системное применение комплексного подхода, ориентированного на развитие сетей связи нового поколения, которые обеспечивают соблюдение регламентов и нормативных требований.

6. В Моделях необходимо предусмотреть возможность повышения требований к эффективности распределения сигналов синхронизации в гетерогенных сетях связи, включая, в первую очередь, оптимизацию систем ЧВО без ухудшения значений выбранных показателей качества систем ЧВО.

II. Определение целевых значений показателей качества.

Показатели качества и их значения зависят от следующих факторов:

- специфики функционирования конкретной сети связи;
- характеристик киберфизических систем, подключенных к сети связи;
- архитектуры сети связи и плотности подключений оконечных устройств;
- требований к синхронизации в условиях высоких нагрузок и динамично изменяющейся топологии сети связи.

Например, для промышленных предприятий, работающих в режиме реального времени (время отклика < 1 мкс), критическим становится минимизация временных задержек и джиттера в передаче данных.

Для городских инфраструктурных систем важно обеспечение масштабируемой синхронизации, способной поддерживать работу тысяч подключённых устройств, включая IoT-устройства, сенсоры и исполнительные механизмы.

III. Системные задачи, решаемые применением Моделей.

Разработка Моделей на основе устройств ЧВО позволит решить ряд системных задач по предотвращению следующих критических проблем функционирования сети:

1. Рассогласование функционирования компонентов системы: отсутствие согласованного времени между узлами киберфизических систем провоцирует рассогласование их работы, что выражается в нарушении распределённых алгоритмов управления, потере согласованности данных и невозможности синхронного выполнения процессов.

2. Сбои в работе систем реального времени: для приложений, функционирующих в режиме жесткого реального времени, точность временной координации играет решающую роль, например, при автономном выполнении заданий беспилотными аппаратами.

3. Угрозы кибербезопасности: несогласованность временных параметров создаёт уязвимости, которые могут быть использованы злоумышленниками для проведения атак на инфраструктуру. Одним из примеров являются атаки на основе временных искажений, которые могут нарушить алгоритмы управления сетью распределенных устройств.

Отсутствие синхронизации в киберфизических систем особенно опасно для сложных систем с высоким уровнем взаимозависимости, таких как умные города, промышленный Интернет вещей или транспортные сети на основе беспилотных транспортных средств. Таким образом, системы ЧВО являются необходимым элементом для обеспечения стабильности, надёжности и безопасности работы киберфизических систем (КФС) в гетерогенных сетях связи.

IV. Применение стандартов при разработке Моделей.

Международные стандарты синхронизации, включая IEEE 1588 PTP, SyncE, NTP и White Rabbit [10-12], представляют собой фундаментальные инструменты для разработки высокоточных, надёжных и масштабируемых решений, в том числе в рамках киберфизических систем. Их применение обеспечивает совместимость между различными компонентами и подсистемами, а также способствует поддержанию стабильности и повышению уровня безопасности функционирования КФС. Эти аспекты играют ключевую роль в успешной интеграции киберфизических систем в стратегически значимые отрасли, такие как транспорт, энергетика, телекоммуникации и здравоохранение.

Стандарты также оказывают значительное влияние на облегчение процессов технологической интеграции, способствуя унификации подходов и обеспечению оперативного взаимодействия между компонентами, произведёнными различными разработчиками. Кроме того, они закладывают основу для формирования глобальной цифровой инфраструктуры, поддерживающей инновации и способствующей ускоренному развитию цифровой экономики.

Указанные стандарты в настоящее время используются в основном для «классических сетей», но они могут стать основой для разработки стандартов синхронизации для киберфизических сетей. Так, например, в статье [13] авторами рассмотрена возможность применения интерфейса CAN для распределения сигналов синхронизации. Данное решение является экспериментальным и пока не стандартизировано, но потенциально может стать основой для разработки новых подходов к синхронизации в гетерогенных сетях связи с подключением КФС, обеспечить высокую точность, надёжность и адаптивность работы систем в условиях высокой плотности подключений и динамически изменяющейся инфраструктуры.

V. Основы применения систем частотно-временного обеспечения в разрабатываемых Моделях.

Системы частотно-временного обеспечения могут занять фундаментальное место в архитектуре киберфизических систем, которые представляют собой сложные интеграции физической инфраструктуры с цифровыми вычислительными платформами и сетями связи. Эти системы находят широкое применение в таких стратегически значимых отраслях, как промышленное производство, энергетический сектор, транспортные системы, здравоохранение, инфраструктура «умных городов», а также в разработке и эксплуатации автономных устройств.

Ключевая роль ЧВО заключается в обеспечении высокой точности временной и частотной синхронизации между всеми компонентами КФС, что формирует основу для их эффективного и надёжного функционирования. Стабильная синхронизация позволяет минимизировать временные рассогласования, координировать действия различных элементов системы в режиме реального времени и предотвращать критические сбои.

Кроме того, применение ЧВО способствует повышению уровня надёжности, производительности и безопасности киберфизических систем, что особенно важно в условиях высокой плотности подключений и разнородной инфраструктуры. Таким образом, частотно-временное обеспечение выступает не только технологическим инструментом, но и стратегическим фактором, определяющим устойчивое развитие и интеграцию КФС в ключевые отрасли экономики и социальной сферы.

VI. Модели, выступающие как инструмент совершенствования конкретных сетей связи за счёт существенного улучшения значений следующих показателей качества:

1. Высокая временная точность, частотная точность.

Модели должны обеспечивать точность синхронизации на уровне наносекунд для поддержки приложений реального времени, которые используются при управлении автономным транспортом, мониторинге промышленных процессов.

2. Стабильность сигналов синхронизации.

Распределение сигналов должно быть устойчивым к джиттеру, асимметрии каналов связи и изменениям топологии сети.

3. Масштабируемость.

Модели обеспечивают работу с большим количеством подключённых устройств, включая IoT-устройства, сенсоры и исполнительные механизмы, без снижения производительности сети.

4. Иерархическое распределение сигналов.

Применение в Моделях многоуровневых схем синхронизации.

5. Возможность функционирования в условиях динамично изменяющейся топологии сети.

Например, обеспечение сигналами точного единого времени автономного беспилотного транспорта.

6. Межпротокольное и межинтерфейсное взаимодействие.

Важно учитывать, что киберфизические системы могут иметь интерфейсы, которые широко не распространены в классических сетях связи.

Например, если в КФС распространён интерфейс CAN, то следует предусмотреть возможность распространения синхросигналов по новым интерфейсам [13].

7. Совместимость.

Удобство интеграции в существующие и перспективные инфраструктуры без значительных затрат.

8. Автоматизация управления.

Применение интеллектуальных систем управления синхронизацией для минимизации участия человека.

Заключение

Таким образом, предлагаемые Модели будут многофункциональными, устойчивыми и масштабируемыми, обеспечат точную и надёжную работу сети связи даже в условиях высокой нагрузки и разнородной инфраструктуры.

В свою очередь, повышение эффективности управления гетерогенными сетями связи становится не только фундаментальной задачей для инновационного развития инфокоммуникационных технологий в России, но и основополагающим условием обеспечения устойчивости инфраструктур, критически значимых для экономического, социального и научного прогресса.

Список литературы

1. Билятдинов К.З. О формировании современного функционального эквивалента сети связи на основе требований к управлению большими техническими системами // Век качества. – 2024. – № 4. – С. 150-162. – Режим доступа: <http://www.agequal.ru/pdf/2024/424008.pdf> (доступ свободный).
2. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования – основы сквозных цифровых технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15. – № 7. – С. 14-22.
3. Шварц М.Л., Рыжков А.В. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезиохронных до когерентных сетей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2021. – № 4. – С. 27-38.
4. Колтунов М.Н., Леготин Н.Н., Шварц М.Л. Сетевая синхронизация. – М.: SYRUSSYSTEMS, 2007. – 240 с.
5. Вексельман М. Синхронизация в сетях нового поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cnews.ru/articles/sinhronizatsiya_v_setyah_novogo_pokoleniya (дата обращения: 01.02.2025).
6. Lionel Sujay Vailshery. Number of IoT-connected devices worldwide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (дата обращения: 01.02.2025).

7. Balakrishnan K., Dhanalakshmi R., Bam Bahadur Sinha, Gopalakrishnan R. Clock synchronization in industrial Internet of Things and potential works in precision time protocol: Review, challenges and future directions // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. – 2023. – № 4. – Pp. 205-219. DOI: 10.1016/j.ijcse.2023.06.001.
8. Bailleul Q. Dimensioning TSN network synchronization in different embedded contexts. Networking and Internet Architecture [cs.NI]. – Institut National Polytechnique de Toulouse – INPT, 2023. English.
9. Коган С. Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на оптическом транспортном уровне // Первая миля. – 2022. – № 4-6.
10. Рыжков А.В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 270 с.
11. IEEE 1588-2019. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. – New York: IEEE, 2019. – 365 p.
12. Ибрагимов И. Синхронизация в больших и неоднородных сетях SyncE // Электронные компоненты. – 2020. – № 12. – С. 30–33.
13. Чикалов Н.В., Билятдинов К.З. Метод синхронизации в гетерогенных сетях связи с высокой плотностью устройств с ограниченными вычислительными ресурсами // International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – Т. 13, № 1. – С. 83-87.

On the development of models of the frequency-time support system for heterogeneous communication networks with the connection of cyber-physical systems in Russia

Chikalov Nikita Vyacheslavovich,
Senior Software Engineer,
Software Development Department JSC "Research Institute "Rubin"
194100, St. Petersburg, Kantemirovskaya St. 5,
n.v.chikalov@rubin-spb.ru

Bilyatdinov Kamil Zakirovich,
Doctor of Technical Sciences, Candidate of Military Sciences,
Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St.
Petersburg State University of Aerospace Instrumentation"
190000, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 67, lit. A,
k74b@mail.ru

The article presents scientific and methodological approaches to the development of models, techniques and algorithms for synchronization for heterogeneous communication networks with the connection of cyber-physical systems, ensuring high quality. Such networks and systems include the Internet of Things, the Industrial Internet of Things, unmanned transport systems, unmanned aerial vehicles, and smart city systems that require maintaining a single time scale to ensure coordinated operation of all components of a heterogeneous network in real time.

It is proposed to form models, methods, and algorithms for synchronization for heterogeneous communication networks with the connection of cyber-physical systems based on a detailed analysis and systematization of requirements due to the specifics of the functioning of such networks, including ensuring a given accuracy of time, phase, and frequency synchronization, adaptation to asymmetric data transmission channels, taking into account dynamic changes in the network topology inherent in modern and future communication networks, as well as an analysis of the requirements for a specific cyber-physical system. Taking into account the current level of development of "smart" infocommunication technologies and their integration into large technical systems, a list of key requirements for the heterogeneous networks under consideration. This list includes such indicators as synchronization accuracy, resistance to communication channel asymmetries, energy efficiency, scalability, as well as compliance with national and international standards in the field of communications.

Keywords: cyber-physical systems; heterogeneous communication networks; synchronization standards; time-frequency support.