



УДК 621.39

Функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной и распределенной системы технологического назначения

А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Канаев А. К., Опарин Е. В., Опарина Е. В. Функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной и распределенной системы технологического назначения // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 282–289. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-282-289

Аннотация

Цель: разработать научно-технические предложения и требования по построению источников синхросигналов и сообщений единого времени для комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени в зависимости от требований в сигналах частотно-временного обеспечения и действующей архитектуры сети связи в рамках решения задачи построения единой системы синхронизации по фазе, времени и частоте в крупных территориально распределенных и промышленных системах технологического назначения. **Методы:** применяемые методы исследования включают основополагающие положения теории построения систем синхронизации, а также инфокоммуникационных систем и сетей. **Результаты:** предложена функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, включающая в свой состав полный набор элементов для выполнения функций синхронизации и доставки сигналов единого времени в существующих и перспективных сложных гетерогенных сетях с различной архитектурой и разнородным оборудованием, отличающаяся от существующих полным учетом существующих в настоящее время технологий доставки сигналов единого времени и частоты, причем как на основе коммутации пакетов, так и на основе коммутации каналов. Предложенная функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени позволит обоснованно подходить к проектированию средств передачи и доставки сигналов единого времени и частоты в разнообразных и разнородных сетях связи, учитывая все потребности в сигналах частотно-временного обеспечения и ограничения действующих сетей связи. **Практическая значимость:** применение источников сигналов единого времени и частоты, в основе которых лежит предложенная функциональная модель, позволит обеспечить гибкую инфраструктуру для обеспечения единства систем единого времени и тактовой сетевой синхронизации, необходимых для корректного функционирования оборудования связи; максимально удовлетворить требования в услугах сигналов синхронизации и сообщений единого времени для перспективных и действующих потребителей; обеспечить возможность поэтапного перехода построения сетей связи от технологий коммутации каналов к технологии коммутации пакетов за счет гибкости в использовании маршрутов и систем передачи, необходимых для распространения синхросигналов и сообщений единого времени.

Ключевые слова: тактовая сетевая синхронизация, система единого времени, частотно-временное обеспечение, телекоммуникационная система, комплексная система синхронизации, шкала времени.

Введение

Поддержание синхронизации оборудования связи является важнейшим условием обеспечения его стабильности при функционировании в составе телекоммуникационных систем (ТКС). В настоящее время в современных сетях связи используются не только системы тактовой сетевой синхронизации (ТСС), но также устройства систем единого времени (СЕВ). В связи с тем что происходит поэтапное изменение инфраструктуры ТКС, внедрение новых сетевых технологий, увеличение числа абонентов, возрастают также требования к системам передачи сигналов частотно-временного обеспечения (ЧВО), особенно это касается систем технологического назначения и промышленных систем [1–3]. Таким образом, в настоящее время актуальна задача формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени (КССДШВ), включающей в свой состав подсистемы ТСС и СЕВ. Ключевыми задачами КССДШВ являются формирование, хранение, передача и доставка до потребителей синхросигналов и сообщений единого времени необходимой стабильности и точности, что в целом будет способствовать укреплению устойчивости процесса функционирования всей телекоммуникационной системы. Важнейшими элементами указанной КССДШВ являются источники сигналов точного времени и частоты, которые способны оптимальным образом изменять свою конфигурацию под постоянно изменяющиеся и увеличивающиеся требования потребителей в условиях разнородных гетерогенных ТКС.

Построение сетевой структуры разработанной комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

Проведенный системный анализ применяющихся в настоящее время средств тактовой

сетевой синхронизации и единого времени позволил сформировать следующую сетевую структуру КССДШВ (рис. 1).

Согласно разработанной сетевой структуре КССДШВ (рис. 1), в качестве эталонных источников синхросигналов и сообщений единого времени применяется инфраструктура Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли России (ГСВЧ). Далее в соответствии с необходимыми уровнями иерархии КССДШВ происходит подключение объединенных источников подсистем ТСС и СЕВ. В качестве оборудования подсистемы ТСС могут выступать первичные эталонные генераторы (ПЭГ), вторичные задающие генераторы (ВЗГ), местные задающие генераторы (МЗГ) и генераторы сетевых элементов (ГСЭ), а в качестве оборудования подсистемы СЕВ в зависимости от разновидностей используемых протоколов передачи сообщений времени выступают сервера времени необходимого уровня и узлы сетей связи, поддерживающие функционирование протоколов передачи сообщений времени.

К средствам передачи сигналов КССДШВ можно отнести в первую очередь волоконно-оптические системы передачи (ВОСП), а также аппаратуру ГНСС [1–3].

Основными действующими и перспективными потребителями услуг и сервисов КССДШВ являются технологические и промышленные сети связи, системы часофикации, электронного документооборота, АРМ, испытательная аппаратура [4, 5].

Заметим, что структура СЕВ является потребителем по отношению к подсистеме ТСС. Аппаратура тактовой сетевой синхронизации обеспечивает подсистему СЕВ высокостабильными синхросигналами частоты

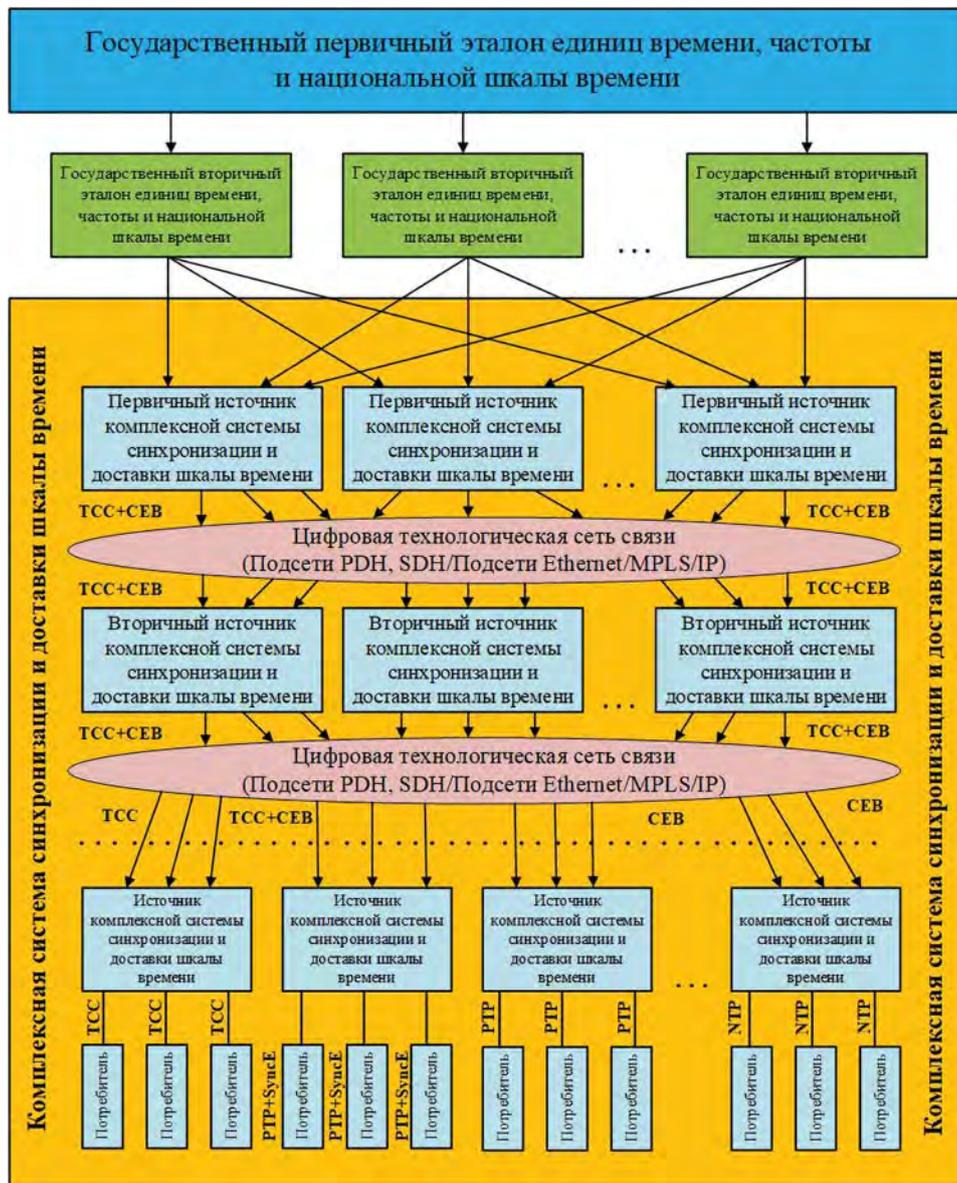


Рис. 1. Сетевая структура комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

с целью увеличения стабильности и точности параметров сигналов синхронизации времени [6–8].

Формирование функциональной модели объединенного источника КССДШВ

Основополагающими элементами в указанной сетевой структуре КССДШВ (рис. 1) являются источники сигналов

частотно-временного обеспечения различных уровней иерархии. Для оптимального построения КССДШВ источники должны обеспечивать в своем процессе функционирования полный набор сигналов времени и частоты в соответствии с уровнем в иерархии, быть гибкими, оперативно подстраиваемыми под изменяющиеся требования потребителей и сетевую архитектуру. Учитывая

указанные требования, функциональная модель объединенного источника КССДШВ будет иметь следующий вид (рис. 2).

Представленная функциональная модель источника (рис. 2) соответствует всем уровням иерархии в сетевой структуре КССДШВ. Данная функциональная модель в общем виде содержит следующие элементы. В первую очередь это модули входных и выходных сигналов единого времени и частоты. Учитывая тот факт, что реальные сети связи разнообразны по своей структуре и используемым технологиям, в состав объединенного источника КССДШВ предполагается включение следующих входных и выходных модулей, учитывая при этом их принадлежность к подсистеме ТСС и СЕВ:

- модуль приема сигналов единого времени со стороны ГНСС, в первую очередь ГЛОНАСС/GPS;
- модуль протокола точного времени RTP (IEEE 1588v2) [9];
- модуль протокола сетевого времени NTP [10, 11];
- модуль синхронного Ethernet SyncE [12, 13];

– модуль приема и передачи сигналов синхронизации по технологии СЦИ [14, 15].

Перечисленные технологии наиболее распространены для передачи сигналов единого времени и частоты, но в зависимости от конкретных условий возможно также и применение дополнительных модулей, таких как интерфейс IRIG, интерфейс TOD, интерфейс 1PPS, синхросигналы 5 МГц и 10 МГц и др.

Вторым важным элементом объединенного источника КССДШВ является схема сравнения и выбора поступающих сигналов единого времени и частоты в соответствии с показателями точности и стабильности. На основании вложенных в схему алгоритмов сравнения происходит выбор конкретного источника для подстройки частоты внутреннего генератора. Внутренний генератор также необходим для хранения текущего времени и формирования сигналов синхронизации в случае отсутствия входящих источников сигналов единого времени и частоты или же их качестве, несоответствующем нормативным значениям. Отметим, что время подстройки частоты внутреннего генератора

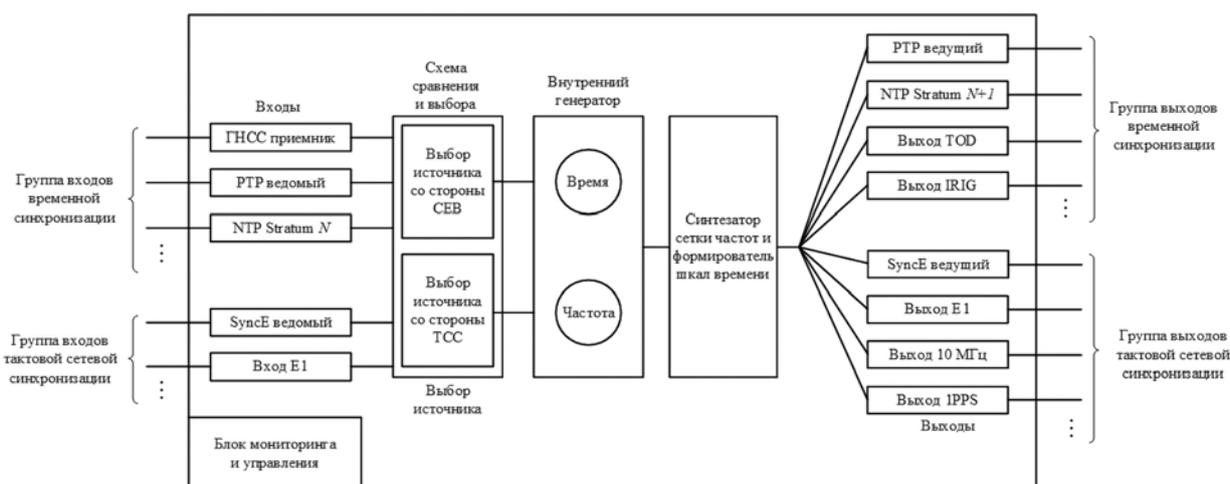


Рис. 2. Функциональная модель объединенного источника КССДШВ

и формирование шкалы времени зависит от выбранного входящего источника, а также от исходного режима работы оборудования.

Для формирования выходных сигналов частотно-временного обеспечения необходим синтезатор сетки частот в случае функционирования в подсистеме ТСС и формирователь шкал времени в случае функционирования в подсистеме СЕВ.

Для обеспечения процесса функционирования объединенного источника КССДШВ необходим также блок мониторинга и управления. При физической реализации устройства необходимы также элементы электропитания и взаимодействия с обслуживающим персоналом.

Функционирование объединенного источника КССДШВ при различных режимах его работы

В случае наличия модуля приема сигналов единого времени со стороны ГНСС данный модуль по сигналам спутниковых радионавигационных систем формирует шкалу времени в виде последовательности импульсов, а также информационное сообщение, привязывающее последовательность импульсов к используемой шкале времени. В случае потери сигнала от спутников формирование сигналов единого времени происходит от внутреннего генератора. Время подстройки внутреннего генератора при использовании модуля ГНСС не является постоянным. Оно зависит от количества спутников, уровня поступающего сигнала, технических характеристик конкретного экземпляра внутреннего генератора и других условий.

Модуль протокола NTP принимает запросы от клиентов и формирует сообщения с точным текущим временем. В общем случае при этом возможны следующие ре-

жимы функционирования «Клиент/сервер», симметричный активный/пассивный, широковещательный режим Broadcast, Multicast, Manycast.

Модуль протокола RTP обеспечивает обмен данными в соответствии с положениями IEEE 1588v2.

Модуль приема и передачи сигналов синхронизации по технологии СЦИ предназначен для приема и формирования сигналов 2.048 МГц или 2.048 Мбит/с в режиме приема или передачи сигнала с поддержкой SSM. Качественные показатели низкочастотного шума в выходном сигнале определяются через МОВИ и ДВИ.

Модуль приема и передачи сигналов синхронизации с применением технологии синхронного Ethernet SyncE обеспечивает доставку синхросигналов в сетях передачи данных, используя потоки Ethernet.

Дополнительные модули обеспечивают прием и передачу сигналов частотно-временного обеспечения в соответствии с алгоритмами своего функционирования.

Блок мониторинга и управления постоянно отслеживает состояние параметров функционирования объединенного источника КССДШВ, в том числе состояние алгоритма подстройки, уровень (точность) подстройки выходной частоты генератора; текущее абсолютное значение разности фаз между выходной частотой внутреннего генератора и источником синхросигнала, наличие синхросигнала на выходе модулей, режимы функционирования модулей, их конфигурацию, а также дополнительные параметры, необходимые для качественного функционирования устройства.

Отметим, что процесс функционирования объединенного источника КССДШВ во многом определяется состоянием внутреннего

генератора, который может функционировать в режиме прогрева, подстройки, захвата, удержания или свободных колебаний, также значительное влияние оказывает качество входных сигналов и состояние антенны ГЛОНАСС/GPS.

Таким образом, построена функциональная модель объединенного источника КССДШВ, в составе которой учтены все элементы, необходимые для эффективного формирования необходимых сигналов частотно-временного обеспечения в соответствии с запросами потребителей и текущей архитектурой телекоммуникационной системы.

Заключение

На основании требований к перспективной КССДШВ сформирована функциональная модель объединенного источника сигналов частотно-временного обеспечения. Данная модель позволяет при ее реализации формировать элементы КССДШВ, способные обеспечить сигналами синхронизации и единого времени полный перечень потребителей в независимости от применяемых технологий доставки сигналов ЧВО и архитектуры сети связи. Отличительной особенностью данной модели является способность учета всех технологий формирования и доставки сигналов ЧВО, а также модульность построения конкретных экземпляров источников сигналов ЧВО в зависимости от конкретных условий применения.

Разработанная функциональная модель объединенного источника КССДШВ позволит обоснованно подходить к выбору и построению средств и способов передачи и доставки синхросигналов и сообщений единого времени в сложных гетерогенных телекоммуникационных системах.

Библиографический список

1. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия. Телеком, 2021. 270 с.
2. Бирюков Н. Л., Триска Н. Р., Худынцев Н. Н. Обзор направлений исследований МСЭ в области частотно-временного обеспечения современных сетей связи // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8, № 2. С. 12–17.
3. Канаев А. К., Тощев А. К. Рекомендации МСЭ-Т в области синхронизации инфотелекоммуникационных систем. Автоматика, связь, информатика. 2018. № 10. С. 8–14.
4. Давыдкин П. Н., Колтунов М. Н., Рыжков А. В. Тактовая сетевая синхронизация. М.: Эко-Трендз, 2004. 205 с.
5. Мазуренко Д. К. Аспекты построения системы частотно-временной сетевой синхронизации сигналов // Т-Comm. Телекоммуникации и Транспорт. 2017. Т. 11, № 8. С. 4–8.
6. Коган С. Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на оптическом транспортном уровне. Часть 1. Общие требования к синхронизации сетей мобильной (сотовой) связи 5G // Первая миля. 2022. № 4. С. 50–59.
7. Коган С. Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на сетевом оптическом транспортном уровне. Часть 2. Сетевая синхронизация по тактовой частоте // Первая миля. 2022. № 5. С. 44–58.
8. Коган С. Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на сетевом оптическом транспортном уровне. Часть 3. Сетевая синхронизация по фазе/времени // Первая миля. 2022. № 6. С. 42–53.
9. IEEE 1588–2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
10. IETF RFC 1305 Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis.
11. IETF RFC 5905 Network Time Protocol Version 4 : Protocol and Algorithms Specification.

12. Рекомендация МСЭ-Т G.8261/Y.1361: «Синхронизация и аспекты синхронизации в пакетных сетях» (29.08.2019).

13. Рекомендация МСЭ-Т G.8265.1/Y.1365.1: «Профиль протокола точного времени для синхронизации по частоте» (29.06.2021).

14. Рекомендация МСЭ-Т G.823: «Контроль дробления и блуждания в цифровых сетях, основанных на иерархии 2048 Кбит/с» (10.03.2000).

15. Рекомендация МСЭ-Т G.803: «Архитектура транспортных сетей, основанная на синхронной цифровой иерархии (СЦИ)» (10.03.2000).

Дата поступления: 15.01.2024

Решение о публикации: 14.02.2024

Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — докт. техн. наук, профессор; kanaevak@mail.ru

ОПАРИН Евгений Валерьевич — канд. техн. наук, доцент; ОпаруН@mail.ru

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доцент; syrayaekaterina@mail.ru

The functional model of the united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale for a large and distributed technological purpose system

A. K. Kanaev, E. V. Oparin, E. V. Oparina

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. The functional model of the united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale for a large and distributed technological purpose system // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 282–289. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-282-289

Abstract

Purpose: to develop scientific and technical proposals and requirements for building sources of synchrosignals and messages of a single time for the integrated system of synchronization and delivery of the time scale depending on the requirements in frequency-time support signals and the current communication chain architecture in the framework of solving a unified synchronization system in phase, time and the frequency in large territorially distributed and industrial technological systems. **Methods:** the applied research methods include the fundamental provisions of the theory of constructing synchronization systems, as well as infocommunication systems and networks. **Results:** a functional model of a united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale, which includes a complete set of elements to perform the functions of synchronization and delivery of single-time signals in existing and promising complex heterogeneous networks with various architecture and heterogeneous equipment that differs from the existing fully taking into account the existing ones in Currently, technologies for delivery of single time and frequency signals, both on the basis of switching packages and on the basis of switching of channels. The proposed functional model of the united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale will allow to reasonably approach the design of the means of transmitting and delivering single time and frequency signals to various and heterogeneous communication networks, taking into account all the needs for frequency-time support signals and limiting existing communication networks. **Practical significance:** the use of sources of single-time and frequency signals, which are based on the proposed functional model, will ensure a flexible infrastructure to ensure the unity of the unity of the unified time and clock network synchronization necessary for the correct

functioning of communication equipment; Satisfy the requirements of synchronization signals and uniform messages for promising and existing consumers as much as possible; ensure the possibility of a phased transition of the construction of communication networks from the technologies of the channels to the technology of switching packages due to flexibility in the use of routes and transmission systems necessary for the spread of synchronsignals and uniform messages.

Keywords: clock network synchronization, a single time system, frequency and temporal support, telecommunication system, complex synchronization system, time scale.

References

1. Ryzhkov A. V. Chastotno-vremennoe obespechenie v setjah jelektrosvjazi. Uchebnoe posobie dlja vuzov. M.: Gorjachaja linija. Telekom, 2021. 270 s. (In Russian)
2. Birjukov N. L., Triska N. R., Hudyncev N. N. Obzor napravlenij issledovanij MSJe v oblasti chastotno-vremennogo obespechenija sovremennyh setej svjazi // T-Comm. Telekommunikacii i transport. 2014. T. 8, № 2. S. 12–17. (In Russian)
3. Kanaev A. K., Toshhev A. K. Rekomendacii MSJe-T v oblasti sinhronizacii infotelekkommunikacionnyh sistem. Avtomatika, svjaz', informatika. 2018. № 10. S. 8–14. (In Russian)
4. Davydkin P. N., Koltunov M. N., Ryzhkov A. V. Taktovaja setevaja sinhronizacija. M.: Jeko-Trendz, 2004. 205 s. (In Russian)
5. Mazurenko D. K. Aspekty postroenija sistemy chastotno-vremennoj setевой sinhronizacii signalov // T-Comm. Telekommunikacii i Transport. 2017. T. 11, № 8. S. 4–8. (In Russian)
6. Kogan C. Seti 5G: raspredelenie signalov sinhronizacii na opticheskom transportnom urovne. Chast' 1. Obshhie trebovanija k sinhronizacii setej mobil'noj svjazi 5G // Pervaja milja. 2022. № 4. S. 50–59. (In Russian)
7. Kogan C. Seti 5G: raspredelenie signalov sinhronizacii na setevom opticheskom transportnom urovne. Chast' 2. Setevaja sinhronizacija po taktovoj chastote // Pervaja milja. 2022. № 5. S. 44–58. (In Russian)
8. Kogan C. Seti 5G: raspredelenie signalov sinhronizacii na setevom opticheskom transportnom urovne. Chast' 3. Setevaja sinhronizacija po faze/vremeni // Pervaja milja. 2022. № 6. S. 42–53. (In Russian)
9. IEEE 1588–2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
10. IETF RFC 1305 Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis.
11. IETF RFC 5905 Network Time Protocol Version 4 : Protocol and Algorithms Specification.
12. Rekomendacija MSJe-T G.8261/Y.1361: “Sinhronizacija i aspekty sinhronizacii v paketnyh setjah” (29.08.2019). (In Russian)
13. Rekomendacija MSJe-T G.8265.1/Y.1365.1: “Profil' protokola tochnogo vremeni dlja sinhronizacii po chastote” (29.06.2021). (In Russian)
14. Rekomendacija MSJe-T G.823: “Kontrol' drozhanija i bluzhdanija v cifrovych setjah, osnovannyh na ierarhii 2048 Kbit/s” (10.03.2000). (In Russian)
15. Rekomendacija MSJe-T G.803: “Arhitektura transportnyh setej, osnovannaja na sinhronnoj cifrovoj ierarhii (SCI)” (10.03.2000). (In Russian)

Received: 15.01.2024

Accepted: 14.02.2024

Author's information:

Andrew K. KANAEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; kanaevak@mail.ru

Evgeniy V. OPARIN — PhD in Engineering, Associate Professor; OnapuH@mail.ru

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor; syrayaekaterina@mail.ru