
НАУЧНАЯ МЫСЛЬ

Е.В. Опарин

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ
ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ**

МОНОГРАФИЯ

**Москва
РИОР**

УДК 621.39
ББК 32.88
О-60

ФЗ
№ 436-ФЗ

Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1

Автор:

Опарин Е.В. — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая связь» ФГБОУ ВО ПГУПС; ведущий специалист ЗАО «Институт телекоммуникаций» (Санкт-Петербург)

Рецензенты:

Канаев А.К. — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрическая связь» ФГБОУ ВО ПГУПС (Санкт-Петербург);

Привалов А.А. — доктор военных наук, профессор, профессор кафедры боевого применения артиллерийских подразделений Военной академии войск национальной гвардии (Санкт-Петербург)

Опарин Е.В.

О-60 **Функционирование системы частотно-временного обеспечения железнодорожного транспорта в условиях воздействия дестабилизирующих факторов : монография / Е.В. Опарин. — Москва : РИОР, 2025. — 248 с. — (Научная мысль). — DOI: <https://doi.org/10.29039/02173-6>**

ISBN 978-5-369-02173-6

В монографии рассмотрены вопросы построения комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени в структуре технологической сети связи железнодорожного транспорта, а также обеспечения ее устойчивости в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, в том числе в условиях воздействия информационных атак организованных злоумышленников.

Предназначено для руководителей и работников предприятий телекоммуникационной отрасли, научных работников, аспирантов и студентов старших курсов, обучающихся по телекоммуникационным направлениям. Может быть полезно для инженеров, занимающихся вопросами проектирования и эксплуатации систем синхронизации и телекоммуникационных систем.

УДК 621.39
ББК 32.88

ISBN 978-5-369-02173-6

© Опарин Е.В.

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт является ведущим элементом транспортной инфраструктуры страны, обеспечивая более 40% от объема внутренних перевозок.

Системы связи являются производственной инфраструктурой, обеспечивающей выполнение основных производственных процессов железнодорожного транспорта. Системы связи как непосредственно участвуют в технологии организации перевозочного процесса, так и предоставляют услуги другим производственным процессам, осуществляя пропуск их трафика, передавая их каналы и тракты. Отсутствие необходимого перечня телекоммуникационных услуг, а также снижение качества услуг приведет к невозможности выполнения объема перевозок пассажиров и грузов, увеличению времени перевозки, снижению безопасности перевозок и другим социально-экономическим последствиям. Инновационное развитие железных дорог невозможно без соответствующего развития систем железнодорожной связи. Для повышения гибкости функционирования железных дорог, повышения качества оказываемых услуг, повышения удовлетворенности пассажиров и контрагентов грузоперевозок требуется внедрение новых информационных сервисов, что требует качественного и количественного развития систем связи.

Основные приоритеты развития систем связи железнодорожного транспорта закреплены в следующих документах:

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга), утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р [170].
2. Концепция развития первичной сети связи ОАО «РЖД» в соответствии с распоряжением Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» № ЦСС-805/р от 29.05.2020 [58].
3. Концепция «Высокоскоростная технологическая сеть передачи данных ОАО «РЖД»».

Указанные нормативные документы определяют целевое состояние систем связи железнодорожного транспорта, которое характеризуется следующими признаками [58, 170]:

1. Основной распространения сигналов первичной сети связи должен быть волоконно-оптический тракт.
2. Применение технологии *xWDM* мультиплексирования оптических сигналов с разделением по длинам волн для оптимального использования ресурса волоконно-оптического тракта. Применение си-

стем *DWDM* на магистральном уровне сети связи, а систем *CWDM* на дорожном уровне сети связи.

3. Использование мультиплексов *SDH* для организации каналов технологических систем, на магистральном уровне — мультиплексов с пропускной способностью *STM-16*, на дорожном уровне — мультиплексов с пропускной способностью *STM-4*.
4. Построение сетей передачи данных с использованием скоростей передачи данных не менее 1 Гбит/с при взаимодействии на уровне периферийных узлов и 10 Гбит/с на уровне транзитно-периферийных узлов.
5. Перевод систем технологической связи на *IP*-технологии.
6. Включение всего эксплуатируемого оборудования связи в единую систему мониторинга и администрирования (ЕСМА).

Фундаментальное изменение инфраструктуры систем связи железнодорожного транспорта не могло не повлиять на подходы к решению задач частотно-временного обеспечения (ЧВО). На всех этапах развития телекоммуникационных технологий одним из важных условий стабильного функционирования систем и сетей связи было и остается решение задач синхронизации, то есть поддержание необходимых временных соотношений протекания процессов во времени. В зависимости от актуальных технологий передачи и коммутации изменяются содержание основополагающих задач синхронизации и способы их решения. В последние годы задачи доставки сигналов синхронизации в большей степени возлагаются на транспортные технологии с пакетным режимом передачи (*Ethernet*, *IP/MPLS*). Современные телекоммуникационные технологии, помимо традиционной передачи тактовой частоты для согласования работы цифровых устройств на уровне тактовых интервалов, требуют также временной или фазовой синхронизации, то есть передачи меток точного времени [27].

В настоящее время высокое качество частотной и временной синхронизации требуется для многих важных телекоммуникационных и технических приложений.

Развитие технологий частотно-временного обеспечения проходило в несколько этапов. Первый этап характеризуется плезизохронным режимом передачи, для которого характерно отсутствие выделенной сетевой структуры синхронизации при ограниченной точности генераторного оборудования (ГО). Генераторное оборудование различных узлов сети функционировало независимо друг от друга в режиме свободных колебаний, поэтому во избежание рассогласования в каждом

направлении передачи поддерживалась однонаправленная передача тактовой частоты. На канальном уровне обеспечивалась синхронизация по циклам передачи. При объединении цифровых потоков для предотвращения расхождения процессов записи и считывания использовались методы цифрового согласования (стаффинга). Данная система получила название плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ), а режим передачи с поддержкой циклов — синхронного режима передачи (СРП).Packetные технологии использовались для передачи данных, некритичных к задержкам [27].

Второй этап развития технологий частотно-временного обеспечения связан с широким распространением цифровых АТС и развитием сетей с цифровой коммутацией каналов. На данном этапе для предотвращения рассогласования скоростей цифровых потоков и потерь блоков информации использовалось повышение точности ГО ЦАТС до величины порядка $0,01 \text{ ppm}$ и установка буферных устройств емкостью, равной двум циклам потока $E1$, для сглаживания расхождения частот записи и считывания. Дополнительно отдельное ГО ЦАТС начинает использоваться в качестве ведущего устройства принудительной тактовой сетевой синхронизации на ограниченном окружении подстанций [27].

Третий этап связан с повсеместным распространением сетей с цифровой коммутацией и передачей и появлением синхронной цифровой иерархии (СЦИ). На данном этапе были сформированы требования к ТСС с синхронным режимом работы (Рекомендации МСЭ-Т *G.810*), были стандартизированы требования к встроенному генераторному оборудованию СЦИ (Рекомендация МСЭ-Т *G.813*), определены характеристики первичного эталонного генератора (ПЭГ) и вторичных задающих генераторов (ВЗГ) (Рекомендации МСЭ-Т *G.811* и *G.812*). В этот же период появляются Рекомендация МСЭ-Т *G.803*, определяющая структуру сети синхронизации, и *G.781*, определяющая функции слоя синхронизации. Параллельно с развитием и стандартизацией систем тактовой синхронизации велись и работы в области временной синхронизации, осуществлена разработка сетевого протокола передачи времени *NTP (Network Time Protocol)*, введены в действие спутниковые навигационные системы (ГЛОНАСС/*GPS*), благодаря которым возможно получить опорные сигналы тактовой частоты и метки точного времени [27].

Четвертый этап вплоть до настоящего времени фиксирует широко-масштабный переход к пакетной передаче в сетях связи. В результате работ по разработке механизмов тактовой синхронизации, которые

бы обеспечили стабильность тактовых сигналов в пакетных сетях на уровне традиционных сетей СЦИ, появилась технология синхронного *Ethernet — SyncE*. Данный факт означал фактический перенос на пакетную сеть классических подходов к синхронизации сетей. Параллельно с разработкой и стандартизацией технологии *SyncE* развивалось направление синхронизации пакетных сетей, основанное на использовании протокола *PTP IEEE 1588* в качестве метода передачи времени и частоты. Получило развитие направление использования комбинированного решения, предусматривающего передачу меток точного времени по протоколу *PTP* в одном из зарезервированных полей в структуре пакетов *SyncE*. Практика эксплуатации пакетных телекоммуникационных сетей показывает, что чем больше новых услуг внедряется в современных сетях связи, тем востребованнее становится технология *SyncE* в комбинации с протоколом *PTP* [27].

Таким образом, на настоящий момент разработано значительное число нормативных и руководящих документов касательно систем частотно-временного обеспечения, созданы необходимые инструкции и методики для проектирования, строительства и эксплуатации систем синхронизации, продолжаются научно-исследовательские и экспериментальные работы в направлениях моделирования процессов синхронизации в пакетных сетях; отработки методов измерений и планирования сетей синхронизации.

Однако проведенный в рамках исследования всесторонний анализ решений в области частотно-временного обеспечения выявил отсутствие комплексной проработки вопросов доставки сигналов точного времени и частоты в условиях воздействия дестабилизирующих факторов (ДФ) различной природы. Системы частотно-временного обеспечения в процессе своего функционирования подвергаются дестабилизирующим воздействиям, направленным на снижение их устойчивости. Дестабилизирующие факторы представляют собой воздействия на системы синхронизации, источником которых является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего характера, приводящие к отказу элементов систем синхронизации.

Учитывая тот факт, что системы частотно-временного обеспечения напрямую не связаны с доставкой полезных информационных сигналов, вопросам обеспечения ее устойчивости не уделялось должного внимания. Устранение отдельных отказов, как правило, решается локальными способами, не затрагивающими комплексного решения обеспечения требуемой устойчивости.

Актуальность темы проведенных исследований обусловлена следующими тенденциями развития современных и перспективных систем связи [163]:

- 1) возрастающими требованиями к качеству обслуживания, предъявляемыми к современным системам частотно-временного обеспечения в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов;
- 2) переходом сетей связи от технологии коммутации каналов (*SDH, PDH*) к технологии коммутации пакетов (*IP/MPLS/Ethernet*);
- 3) переходом инфокоммуникаций на контент-ориентированные услуги;
- 4) переходом к мобильным сетям следующих поколений (*Next Generation Mobile Networks — NGMN, LTE*);
- 5) расширением спектра дестабилизирующих воздействий, в частности воздействий искусственного происхождения;
- 6) централизацией процессов управления современными и перспективными сетями связи;
- 7) ростом числа потребителей услуг систем частотно-временного обеспечения.

Вопросы построения и технической эксплуатации систем частотно-временного обеспечения подробно освещены в работах А.К. Канаева, А.В. Рыжкова, А.Ю. Насонова, Е.О. Новожилова, Н.Л. Бирюкова, М.Н. Колтунова, Н.Н. Леготина, М.Л. Шварца. Исследования по оценке устойчивости телекоммуникационных систем отражены в работах С.М. Одоевского, А.А. Привалова, И.И. Чуляева, М.М. Добрышина, Ю.И. Стародубцева, Е.В. Гречишникова, А.С. Белова, Р.В. Максимова, Ю.К. Язова, В.И. Калюки, С.И. Макаренко. Комплексные вопросы оценки дестабилизирующих воздействий на инфокоммуникационные системы представлены в исследованиях О.С. Лауты, М.А. Коцыняка, И.В. Котенко, И.Б. Саенко, А.В. Боговика, А.А. Бойко, С.А. Будникова, Г.А. Остапенко.

Тем не менее вопросы, связанные с оценкой устойчивости процесса функционирования систем синхронизации и доставки сигналов точного времени в условиях воздействия различных видов дестабилизирующих факторов, не были в должной степени проработаны в современных научных трудах, что подтверждает актуальность проведенных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Alghamdi, W.* Cyber Attacks on Precision Time Protocol Networks — A Case Study / Waleed Alghamdi, Michael Schukat // *Electronics*. — 2020. — Vol. 9(9). — P. 25.
2. *Alghamdi, W.* Precision time protocol attack strategies and their resistance to existing security extensions / Waleed Alghamdi, Michael Schukat // *Cybersecurity*. — 2021. — Vol. 4(1). — P. 17.
3. ETSI EN 300 462-1-1 V1.1.1 (1998-05). Общие требования для сетей синхронизации; Часть 1-1: Определения и терминология для сетей синхронизации.
4. ETSI EN 300 462-2-1 V1.2.1 (2002-01). Общие требования для сетей синхронизации; Часть 2-1: Архитектура сети синхронизации, основанная на сетях СЦИ.
5. ETSI EN 300 462-3-1 V1.1.1 (1998-05). Общие требования для сетей синхронизации; Часть 3-1: Управляемые дрожания и дрейф фазы в сетях синхронизации.
6. ETSI EN 300 462-4-1 V1.1.1 (05/98). Временные характеристики ведомых генераторов для обеспечения синхронизацией оборудования СЦИ и ПЦИ.
7. ETSI EN 300 462-5-1 V1.1.2 (1998-05). Общие требования для сетей синхронизации; Часть 5-1: Временные характеристики ведомых генераторов для работы оборудования синхронной цифровой иерархии СЦИ.
8. ETSI EN 300 462-7-1 V1.1.1 (05/2000). Общие требования для сетей синхронизации; Часть 7-1: Временные характеристики ведомых задающих генераторов, подходящих для обеспечения синхронизацией аппаратуры на местных узлах.
9. Haken, H. *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems* / H. Haken // Springer Berlin, Heidelberg. — 2006. — 258 p.
10. URL: <https://portal-css.rzd.ru/?ysclid=m53nl71kag917958378>.
11. IEEE 1588-2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
12. IETF RFC 1305 Network Time Protocol Version 3: Specification, Implementation and Analysis.
13. IETF RFC 5905 Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification.

14. *Jimoh, O.* Analyzing Network Time Protocol (NTP) Based Amplification DDoS Attack and its Mitigation Techniques / Hammed. O. Jimoh, Mubarak. O. Ahmed // Digital Innovations & Contemporary Research in science, engineering & technology. — 2024. — Vol. 12. — № 2. — Pp. 17–24.
15. *Mahlous, A.* Quantitative Risk Analysis of Network Time Protocol (NTP) Spoofing Attacks / Ahmed Redha Mahlous // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — Pp. 164891–164910.
16. *Moradi, M.* A Petri net model for Time-Delay Attack detection in Precision Time Protocol-based networks / Mohsen Moradi, Amir Hossein Jahangir // IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications. — 2024. — Vol. 9. — Pp. 407–423.
17. *Moussa, B.* An Extension to the Precision Time Protocol (PTP) to Enable the Detection of Cyber Attacks / Bassam Moussa, Marthe Kassouf, Rachid Hadjidj, Mourad Debbabi, Chadi Assi // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2019. — Vol. 16. — № 1. — Pp. 18–27.
18. *Muhlbauer, W.K.* Pipeline Risk Management Manual / W. K. Muhlbauer // Ideas, Techniques, and Resources. Third Edition. Elsevier Inc. — 2004. — 416 p.
19. *Oparin, E.V.* Generalized model of functioning of generator equipment of synchronization network with the limited reliability of its elements / A.K. Kanaev, E.V. Oparin, A.A. Privalov, V.V. Sapozhnikov // CEUR Workshop Proceedings. First Workshop Computer Science and Engineering in the framework of the 5th International Scientific-Methodical Conference “Problems of Mathematical and Natural-Scientific Training in Engineering Education”. — 2019. — Pp. 6–11.
20. *Oparin, E.V.* Identification of the states of the synchronization system based on its entropy analysis / A.K. Kanaev, E.V. Oparin, E.V. Oparina // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2023. — Т. 17. — № 3. — С. 48–53.
21. *Schönberger, L.* Towards an Increased Detection Sensitivity of Time-Delay Attacks on Precision Time Protocol / Lea Schönberger, Mohammad Hamad, Javier Velasquez Gomez, Sebastian Steinhorst, Selma Saidi // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 157398–157410.
22. *Wilson, A.G.* Entropy in Urban and Regional Modelling / A.G. Wilson // Pion Limited. London. — 1970. — 166 p.

23. *Алгазинов, Э.К.* Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем / Под общ. ред. д. т. н. А.А. Сироты. — М.: Диалог-МИФИ, 2009. — 416 с.
24. *Алексеев, Ю.А.* Аудит сетей ТСС: необходимость и практика применения / Ю.А. Алексеев, М.Н. Колтунов, М.Л. Шварц // *Электросвязь*. — 2000. — № 8. — С. 27–28.
25. *Беляев, Ю.К.* Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И.А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. — 608 с.
26. *Бирюков, А.А.* Информационная безопасность: защита и нападение. Третье издание / А.А. Бирюков — М.: ДМК Пресс, 2024. — 440 с.
27. *Бирюков, Н.Л.* Обзор направлений исследований МСЭ в области частотно-временного обеспечения современных сетей связи / Н.Л. Бирюков, Н.Р. Триска, Н.Н. Худынец // *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*. — 2014. — Т. 8. — № 2. — С. 12–17.
28. *Боговик, А.В.* Теория управления в системах военного назначения / Под редакцией И.В. Котенко. — М.: МО РФ, 2001. — 320 с.
29. *Большаков, А.А.* Методы обработки многомерных данных и временных рядов: учебное пособие для вузов / А.А. Большаков, Р.Н. Каримов. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 522 с.
30. *Будко, П.А.* Управление в сетях связи. Математические модели и методы оптимизации: монография / П.А. Будко, В.В. Федоренко. — М.: Издательство физико-математической литературы, 2003. — 228 с.
31. *Буренин, А.Н.* Теоретические основы управления современными телекоммуникационными сетями: монография / А.Н. Буренин, В.И. Курносов. — М.: Наука, 2011. — 464 с.
32. *Вадзинский, Р.Н.* Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. — СПб.: Наука, 2001. — 295 с.
33. *Вентцель, Е.С.* Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. — 576 с.
34. *Вентцель, Е.С.* Теория вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. — 368 с.
35. *Вознюк, М.А.* Теоретические основы квалиметрии информационных систем / М.А. Вознюк, А.А. Мусаев, А.В. Елшин. — СПб.: ВУС, 1999. — 108 с.

36. *Гайдышев, И.А.* Анализ и обработка данных: специальный справочник / И.А. Гайдышев. — СПб.: Питер, 2001. — 752 с.
37. ГОСТ 8.567—2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения.
38. ГОСТ Р 53111—2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки.
39. ГОСТ Р 53245—2008. Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Монтаж основных узлов системы. Методы испытания.
40. ГОСТ Р 8.930—2016. Передача единиц времени, частоты и национальной шкалы времени UTC(SU) от государственного первичного эталона Российской Федерации с использованием системы ГЛОНАСС. Основные положения.
41. *Давыдкин, П.Н.* Исследование систем тактовой сетевой синхронизации и разработка метода их совершенствования: дисс. ... канд. техн. наук / П.Н. Давыдкин. — М., 2005. — 183 с.
42. *Давыдкин, П.Н.* Тактовая сетевая синхронизация / П.Н. Давыдкин, М.Н. Колтунов, А.В. Рыжков. — М.: Эко-Трендз, 2004. — 205с.
43. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года, утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации №466-р от 19.03.2019.
44. *Дудник, Б.Я.* Надежность и живучесть систем связи / Б.Я. Дудник, В.Ф. Овчаренко, В.К. Орлов. — М.: Радио и связь, 1984. — 216 с.
45. *Евглевская, Н.В.* Сравнительный анализ эффективности существующих методов защиты сетей связи от DDoS-атак / Н.В. Евглевская, О.С. Лаута, А.Ю. Зуев, А.О. Карасенко // Радиопромышленность. — 2020. — Т. 30. — № 3. — С. 67–74.
46. ЕСМА. Справочник пользователя. — Нижний Новгород: Транс-сеть, 2017. — 220 с.
47. *Ефремов, М.А.* Обзор подходов к определению актуальных угроз информации телекоммуникационным системам и предложения по их совершенствованию / М.А. Ефремов, И.В. Калущкий, М.О. Таныгин, А.Г. Фрундин // Телекоммуникации. — 2017. — № 5. — С. 27–33.

48. *Иванов, А.Ю.* Военно-технические основы построения и математическое моделирование перспективных средств и комплексов автоматизации / А.Ю. Иванов, С.П. Полковников, Г.Б. Ходасевич. — СПб.: ВАС, 1997. — 419 с.
49. *Канаев, А.К.* Рекомендации МСЭ-Т в области синхронизации инфотелекоммуникационных систем / А.К. Канаев, А.К. Тощев // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 10. — С. 8–14.
50. *Карпов, Е.А.* Основы теории управления в системах военного назначения / Е.А. Карпов, И.В. Котенко, А.В. Боговик [и др.]. — СПб.: ВУС, 2000. — 158 с.
51. *Коган, С.* Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на оптическом транспортном уровне. Часть 1. Общие требования к синхронизации сетей мобильной (сотовой) связи 5G / С. Коган // Первая миля. — 2022. — № 4(104). — С. 50–59.
52. *Коган, С.* Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на сетевом оптическом транспортном уровне. Часть 2. Сетевая синхронизация по тактовой частоте/ С. Коган // Первая миля. — 2022. — №5(105). — С. 44–58.
53. *Коган, С.* Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на сетевом оптическом транспортном уровне. Часть 3. Сетевая синхронизация по фазе/времени / С. Коган // Первая миля. — 2022. — № 6(106). — С. 42–53.
54. *Колтунов, М.Н.* Организация системы тактовой сетевой синхронизации на ведомственных и корпоративных цифровых сетях связи / М.Н. Колтунов, А.В. Рыжков // Электросвязь. — 2001. — № 6. — С. 21–24.
55. *Колтунов, М.Н.* Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России / М.Н. Колтунов, М.Л. Шварц // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2018. — Т. 9. — № 2. — С. 113–120.
56. *Колтунов, М.Н.* Особенности измерения параметров в системе тактовой сетевой синхронизации / М.Н. Колтунов, М.Л. Шварц // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2016. — № 1. — С. 33–41.
57. *Коновалов, Г.В.* Компьютерное моделирование сети синхронизации / Г.В. Коновалов // Электросвязь. — 2001. — № 6. — С. 30–34.

58. Концепция развития первичной сети связи ОАО «РЖД», в соответствии с распоряжением Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» №ЦСС-805/р от 29.05.2020.
59. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» № 1285 от 05.12.2017.
60. *Котенко, И.В.* Теория и практика построения автоматизированных систем информационной и вычислительной поддержки процессов планирования связи на основе новых информационных технологий. Монография / И.В. Котенко. — СПб.: ВАС, 1998. — 404 с.
61. *Котенко, И.В.* Интеллектуальные системы для управления связью: учебное пособие / И.В. Котенко, Г.А. Рябов, И.Б. Саенко. — СПб.: ВАС, 1996. — 150 с.
62. *Котенко, И.В.* Атаки и методы защиты в системах машинного обучения: анализ современных исследований / О.С. Лаута, И.В. Котенко, И.Б. Саенко [и др.] // Вопросы кибербезопасности. — 2024. — № 1(59). — С. 24–37.
63. *Коцыняк, М.А.* Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства / М.А. Коцыняк, А.И. Осадчий, М.М. Коцыняк [и др.]. — СПб.: Типография Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 2014. — 126 с.
64. *Коцыняк, М.А.* Математическая модель таргетированной компьютерной атаки / О.С. Лаута, М.А. Коцыняк, Д.А. Иванов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 73–81.
65. *Коцыняк, М.А.* Методика оценки устойчивости информационно-телекоммуникационной сети в условиях информационного противоборства / О.С. Лаута, М.А. Коцыняк, А.П. Нечепуренко // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2019. — № 1-2(127-128). — С. 58–62.
66. *Коцыняк, М.А.* Модель воздействия таргетированной кибернетической атаки на информационно-телекоммуникационную сеть / О.С. Лаута, М.А. Коцыняк, Д.А. Иванов, О.М. Лукина // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2019. — № 3-4(129-130). — С. 58–65.

67. *Коцыняк, М.А.* Модель системы воздействия на информационно-телекоммуникационную систему специального назначения в условиях информационного противоборства / О.С. Лаута, М.А. Коцыняк, А.П. Нечепуренко // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2019. — № 3-4(129-130). — С. 40–44.
68. *Коцыняк, М.А.* Подход к управлению системой защиты информационно-телекоммуникационной сети специального назначения / О.С. Лаута, М.А. Карпов, М.А. Коцыняк, А.М. Крибель // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 7. — С. 216–226.
69. *Коцыняк, М.А.* Распределение средств защиты информационно-телекоммуникационной сети в условиях воздействия таргетированных кибернетических атак / О.С. Лаута, М.А. Коцыняк, Д.А. Иванов, О.Л. Спицын // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2019. — № 2(34). — С. 19–22.
70. *Крибель, А.М.* Методика обнаружения компьютерных атак с помощью фрактального анализа и методов машинного обучения / О.С. Лаута, А.М. Крибель, Р.А. Перов, В.Б. Сычужников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 5. — С. 166–178.
71. *Ксенз, С.П.* Борьба с диагностическими ошибками при техническом обслуживании и ремонте систем управления связи и навигации: учебное пособие / С.П. Ксенз, М.И. Полтаржицкий, С.П. Алексеев, В.В. Минеев. — СПб.: ВАС, 2010. — 240 с.
72. *Куликов, И.Е.* Исследование и разработка систем тактовой сетевой синхронизации: дисс. ... канд. техн. наук / И.Е. Куликов. — М., 2003. — 210 с.
73. *Лаута, О.С.* Комплексная методика обнаружения кибератак на основе интеграции фрактального анализа и статистических методов / О.С. Лаута, Р.А. Перов, О.М. Крибель, Ю.М. Федулов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 44–51.
74. *Лаута, О.С.* Метод выявления аномалий в сетевом трафике / О.С. Лаута, Р.А. Перов, А.М. Крибель, Ю.В. Федулов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 25–31.

75. *Лаута, О.С.* Методика повышения устойчивости ИТКС в условиях воздействия противника на основе определения опорного варианта / О.С. Лаута, С.А. Багрецов, Э.А. Бударин, М.В. Митрофанов // *Электросвязь*. — 2020. — № 9. — С. 64–68.
76. *Лаута, О.С.* Методика управления защитой информационно-телекоммуникационной сети / О.С. Лаута, М.А. Карпов, М.В. Митрофанов, Д.А. Пальцин // *Электросвязь*. — 2021. — № 12. — С. 49–57.
77. *Лаута, О.С.* Модели компьютерных атак на программно-конфигурируемые сети / О.С. Лаута, И.В. Котенко, И.Б. Саенко, С.Ю. Скоробогатов // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 37–47.
78. *Лаута, О.С.* Модель выявления аномалий в сетевом трафике сети передачи данных в условиях компьютерных атак / О.С. Лаута, А.М. Крибель, Р.А. Перов, С.Ю. Скоробогатов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. — 2022. — № 5. — С. 228–239.
79. *Лаута, О.С.* Подход к обеспечению живучести информационно-телекоммуникационной сети в условиях воздействия противника / О.С. Лаута, С.А. Багрецов, Р.В. Пузынин, А.Ю. Талденко // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. — 2020. — № 3. — С. 160–171.
80. *Лаута, О.С.* Подход к определению вероятностно-временных характеристик целевых компьютерных воздействий / О.С. Лаута, Е.И. Данилова, Д.С. Ракицкий, С.Н. Ракицкий // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. — 2019. — № 2(34). — С. 281–285.
81. *Лаута, О.С.* Подход к оценке качества элементов информационно-телекоммуникационной сети в условиях целевых компьютерных атак / О.С. Лаута, М.А. Коцыняк, Д.А. Иванов, О.Л. Спицын // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. — 2019. — № 2(34). — С. 23–25.
82. *Лебедева О.В.* Энтропийное моделирование динамики многомерных стохастических систем: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — Челябинск, 2015. — 174 с.
83. *Мазуренко, Д.К.* Аспекты построения системы частотно-временной сетевой синхронизации сигналов / Д.К. Мазуренко // *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*. — 2017. — Т. 11. — № 8. — С. 4–8.

84. *Мазуренко, Д.К.* Разработка пакета прикладных программ для математического моделирования и оптимизации процессов передачи и приема сигналов в системах связи / Д.К. Мазуренко // Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2018. — Т. 12. — № 8. — С. 38–43.
85. *Мазуренко, Д.К.* Разработка прецизионного генератора шкалы времени / Д.К. Мазуренко // Электросвязь. — 2019. — № 6. — С. 31–35.
86. *Мазуренко, Д.К.* Требования к точности синхронизации сетей радиодоступа и средств сетевой поддержки при построении системы синхронизации сигналов / Д.К. Мазуренко, Д.А. Пальцин, А.С. Фень // Электросвязь. — 2022. — № 12. — С. 18–21.
87. *Мазуренко, Д.К.* Требования к частотно-временному обеспечению и синхронизации систем спутниковой радиосвязи / Д.К. Мазуренко // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. — 2021. — Т. 11. — № 2. — С. 23–28.
88. *Мазуренко, Д.К.* Эксплуатация оборудования системы синхронизации сигналов в сетях, построенных на технологии коммутации пакетов, и в сетях 5G / Д.К. Мазуренко, Д.А. Пальцин, А.С. Фень // Электросвязь. — 2022. — № 12. — С. 14–17.
89. *Малыгин, С.В.* Особенности построения систем тактовой сетевой синхронизации для распределенных сетей связи / С.В. Малыгин, М.Л. Шварц // Информатизация и связь. — 2021. — № 1 — С. 29–40.
90. МСЭ-R TF.1011-1. Системы, методы и службы для передачи сигналов времени и частоты // Рекомендации МСЭ-R. Излучения сигналов времени и стандартных частот. — Бюро Радиосвязи, МСЭ, Женева. — 1998. — С. 31–36.
91. МСЭ-R TF.685. International synchronization of UTC time scale, 06-1990.
92. МСЭ-T G.652 (13.11.2016). Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.
93. МСЭ-T G.657 (13.11.2016). Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на изгибе
94. МСЭ-T G.781 (13.01.2024). Функции уровня синхронизации для частотной синхронизации на основе физического уровня.
95. МСЭ-T G.803 (10.03.2000). Архитектура транспортных сетей, основанная на синхронной цифровой иерархии (СЦИ).

96. МСЭ-Т G.810 (01.08.1996). Определения и терминология для сетей синхронизации.
97. МСЭ-Т G.811 (19.09.1997). Временные характеристики на выходах первичных эталонных задающих генераторов.
98. МСЭ-Т G.811.1 (13.08.2017) Характеристики синхронизации улучшенного первичного эталонного генератора.
99. МСЭ-Т G.812 (13.06.2004). Временные характеристики на выходах задающих генераторов, пригодных для использования в качестве узловых генераторов сетей синхронизации.
100. МСЭ-Т G.813 (16.03.2003). Характеристики хронирования ведомых тактовых генераторов аппаратуры СЦИ (SEC).
101. МСЭ-Т G.822 (25.11.1988). Нормы на интенсивность управляемых проскальзываний в международном цифровом соединении.
102. МСЭ-Т G.823 (10.03.2000). Контроль дрожания и блуждания в цифровых сетях, основанных на иерархии 2048 кбит/с.
103. МСЭ-Т G.8251 (29.11.2018). Управление фазовым дрожанием и дрейфом фазы в оптической транспортной сети (ОТС).
104. МСЭ-Т G.8260 (15.03.2020). Определения и терминология для синхронизации в пакетных сетях.
105. МСЭ-Т G.8261.1/Y.1361.1 (13.02.2012). Сетевые пределы изменения задержки пакета, применимые к методам на основе пакетов (Синхронизация по частоте).
106. МСЭ-Т G.8261/Y.1361 (29.08.2019). Синхронизация и аспекты синхронизации в пакетных сетях.
107. МСЭ-Т G.8265.1/Y.1365.1 (29.06.2021). Профиль протокола точного времени для синхронизации по частоте.
108. МСЭ-Т G.8265/Y.1365 (07.10.2010). Архитектура и требования для доставки значений частот в пакетном режиме.
109. МСЭ-Т G.8271.1/Y.1366.1 (15.03.2020). Сетевой лимит при синхронизации времени в сетях с коммутацией пакетов.
110. МСЭ-Т G.8271/Y.1366 (15.03.2020). Аспекты временной и фазовой синхронизации в сетях с коммутацией пакетов.
111. МСЭ-Т G.8272.1/Y.1367.1 (13.11.2016). Характеристики синхронизации первичного эталонного генератора шкалы времени.
112. МСЭ-Т G.8272/Y.1367 (29.11.2018). Характеристики хронирования первичных эталонных тактовых генераторов.
113. МСЭ-Т G.8273.2/Y.1368.2 (29.10.2020). Параметры сигналов синхронизации для граничных часов и ведомых часов, предна-

- значенных для использования в сети связи с полной поддержкой синхронизации по времени.
114. МСЭ-Т G.8273.3/Y.1368.3 (29.10.2020). Параметры сигналов синхронизации для прозрачных часов, предназначенных для использования в сети связи с полной поддержкой синхронизации по времени.
 115. МСЭ-Т G.8273/Y.1368 (16.03.2018). Основа синхронизации фазы и времени.
 116. МСЭ-Т G.8275.1/Y.1369.1 (15.03.2020). Профиль электросвязи на основе протокола точного времени для фазовой/временной синхронизации с полной поддержкой по синхронизации от сети.
 117. МСЭ-Т G.8275.2/Y.1369.2 (15.03.2020). Профиль протокола точного времени в электросвязи для временной/фазовой синхронизации с частичной поддержкой по синхронизации от сети.
 118. МСЭ-Т G.8275/Y.1369 (29.10.2020). Архитектура и требования к передаче сигналов синхронизации через сеть связи с пакетной коммутацией.
 119. МСЭ-Т O.172 (13.04.2005). Аппаратура для измерения дрожания и дрейфа фазы в цифровых системах, основанных на синхронной цифровой иерархии (СЦИ).
 120. МСЭ-Т Y.1541 (14.12.2011). Требования к сетевым показателям качества для служб, основанных на протоколе IP.
 121. *Насонов, А.Ю.* Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи / А.В. Рыжков, А.Ю. Насонов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2019. — Т. 10. — № 1. — С. 49–52.
 122. *Новожилов, Е. О.* Система единого времени в АСУ ОАО «РЖД» / Е.О. Новожилов // Автоматика, связь, информатика. — 2006. — № 4. — С. 23–27.
 123. *Новожилов, Е.О.* Средства и способы обеспечения единого точного времени / А.В. Рыжков, Е.О. Новожилов // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 12. — С. 7–11.
 124. НТП ЦТКС-ФЖТ—2002. Нормы технологического проектирования цифровых телекоммуникационных сетей на федеральном железнодорожном транспорте.
 125. *Опарин, Е.В.* Имитационная модель противоборства организованного злоумышленника и системы обеспечения информационной безопасности при реализации атаки на систему управ-

- ления сетью тактовой сетевой синхронизации / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, Е.В. Опарина // Труды учебных заведений связи. — 2021. — Т. 7. — № 4. — С. 31–42.
126. *Опарин, Е.В.* Имитационная модель процесса реализации атаки на систему управления сетью синхронизации / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, Е.В. Опарина, М.А. Сахарова // Информация и космос. — 2023. — № 1. — С. 112–118.
127. *Опарин, Е.В.* Имитационная модель процесса функционирования и восстановления сети тактовой сетевой синхронизации / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, М.А. Сахарова // Информатизация и связь. — 2020. — № 4. — С. 83–90.
128. *Опарин, Е.В.* Интеллектуальная система управления сетью ТСС / А.К. Канаев, Е.В. Опарин // Автоматика, связь, информатика. — 2013. — № 9. — С. 13–25.
129. *Опарин, Е.В.* Концептуальная модель комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, Е.В. Опарина // Информатизация и связь. — 2023. — № 3. — С. 27–34.
130. *Опарин, Е.В.* Методика мониторинга технического состояния сети тактовой сетевой синхронизации на основе энтропийного анализа диагностических параметров ее элементов / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, Е.В. Опарина // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. — 2021. — № 3. — С. 108–117.
131. *Опарин, Е.В.* Методика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения / Е.В. Опарин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2023. — Т. 20. — № 3. — С. 768–784.
132. *Опарин, Е.В.* Моделирование атаки на систему управления сетью синхронизации / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, А.Н. Горбач // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2020. — № 72. — С. 35–47.
133. *Опарин, Е.В.* Обеспечение информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации на основе ее энтропийного анализа / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, Е.В. Опарина // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 505–514.

134. *Опарин, Е.В.* Обобщенная модель действий злоумышленника на начальном этапе реализации атаки на систему управления сетью синхронизации / А.А. Привалов, А.К. Канаев, Е.В. Опарин // *Информация и космос.* — 2023. — № 3. — С. 70–77.
135. *Опарин, Е.В.* Обобщенная модель действий злоумышленника при манипулировании сообщениями, содержащими сигналы точного времени / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, Е.В. Опарина // *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт.* — 2022. — Т. 16. — № 6. — С. 31–37.
136. *Опарин, Е.В.* Обобщенная модель действий злоумышленника при реализации DoS-атаки на комплексную систему синхронизации и доставки шкалы времени / Е.В. Опарин // *Информация и космос.* — 2024. — № 2. — С. 93–101.
137. *Опарин, Е.В.* Полумарковская модель действий злоумышленника при атаке на систему управления сетью тактовой сетевой синхронизации / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, М.А. Сахарова // *Информация и космос.* — 2020. — № 4. — С. 46–56.
138. *Опарин, Е.В.* Полумарковская модель деятельности злоумышленника при реализации атаки спуфинга в подсистеме единого времени / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, Е.В. Опарина // *Ракетно-космическое приборостроение информационные системы.* — 2022. — Т. 9. — №4. — С. 9–16.
139. *Опарин, Е.В.* Проблемы синхронизации современного телекоммуникационного оборудования / Н.Л. Сторожук, Е.В. Опарин // *Первая миля.* — 2023. — № 2(110). — С. 66–70.
140. *Опарин, Е.В.* Формирование модели процесса функционирования и восстановления сети тактовой сетевой синхронизации в условиях применения автоматизированной системы поддержки принятия решений / А.К. Канаев, Е.В. Опарин, А.К. Тоцев // *Бюллетень результатов научных исследований* — 2011. — №1. — С. 41–55.
141. *Опарин, Е.В.* 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 // *Известия Петербургского университета путей сообщения.* — 2024. — Т. 21. — № 1. — С. 282–289.

142. ОСТ 32.180—2001. Система оперативно-технологической связи железных дорог России. Система тактовой сетевой синхронизации: структура сети, нормы качества.
143. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.02.2001 № 125 «О создании Межведомственной комиссии по времени и эталонным частотам».
144. Постановление Правительства РФ от 28.03.2005 № 161 «Об утверждении Правил присоединения сетей электросвязи и их взаимодействия».
145. Правила применения оборудования тактовой сетевой синхронизации, утвержденные приказом Мининформсвязи России от 07.12.2006 № 161.
146. *Привалов, А.А.* Разработка модели обнаружения компьютерных атак на программно-конфигурируемые сети / О.С. Лаута, С.Ю. Скоробогатов, Р.А. Перов, А.А. Привалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2023. — № 5. — С. 181–193.
147. Приказ Минкомсвязи России от 02.03.2009 № 31 «Об утверждении требований к построению сети связи общего пользования в части системы обеспечения тактовой сетевой синхронизации».
148. Приказ Росстандарта от 09.04.2018 № 650 «Об утверждении состава и структуры технических средств и систем Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли».
149. РД 45.230—2001. Аудит системы тактовой сетевой синхронизации.
150. Рекомендация отрасли Р 45.09—2001. Присоединение сетей операторов связи к базовой сети тактовой сетевой синхронизации.
151. Рекомендация отрасли Р 45.12—2001. Эксплуатация первичных эталонных генераторов на взаимоувязанной сети связи Российской Федерации.
152. *Романов, В.Н.* Системный анализ для инженеров / В.Н. Романов. — СПб.: СЗГЗТУ, 2006. — 186 с.
153. РТМ ОТС-ТСС-Орг—2001. Руководящий технический материал по организационному обеспечению системы тактовой сетевой синхронизации (ТСС) для цифровых и цифро-аналоговых сетей оперативно-технологической связи.

154. РТМ ОТС-ТСС-Пр—2001. Руководящий технический материал по проектированию системы тактовой сетевой синхронизации (ТСС) для цифровых и цифро-аналоговых сетей оперативной-технологической связи.
155. Руководящий документ РД 45.035—99. Аппаратура синхронизации второго уровня иерархии. Вторичный задающий генератор — ВЗГ. Технические требования.
156. Руководящий технический материал по построению тактовой сетевой синхронизации на цифровой сети РФ — ЦНИИС. М., 1995.
157. *Рыжков, А.В.* Особенности измерений ошибки времени в системах временной синхронизации сетей связи / А.В. Рыжков, М.Л. Шварц, В.М. Аладин, И.А. Савчак // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2023. — Т. 14. — № 6. — С. 23–29.
158. *Рыжков, А.В.* Поддержание достоверности шкалы времени в ведущих сетевых часах в условиях преднамеренных помех / А.В. Рыжков, М.Л. Шварц, В.М. Аладин // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2023. — Т. 17. — № 11. — С. 4–9.
159. *Рыжков, А.В.* Проблемы сличения шкал времени в пакетных сетях электросвязи / А.В. Рыжков, М.Н. Колтунов, А.Ю. Насонов, М.Л. Шварц // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2017. — Т. 11. — № 11. — С. 10–17.
160. *Рыжков, А.В.* Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи / А.В. Рыжков, М.Л. Шварц // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2020. — Т. 14. — № 2. — С. 17–24.
161. *Рыжков, А.В.* Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезиохронных до когерентных сетей / А.В. Рыжков, М.Л. Шварц // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2021. — Т. 12. — № 4. — С. 27–38.
162. *Рыжков, А.В.* Формирование шкалы времени в когерентной сети связи общего пользования / А.В. Рыжков, С.Ю. Медведев, К.Г. Мишагин [и др.] // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2023. — Т. 17. — № 12. — С. 29–35.
163. *Рыжков, А.В.* Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи / А.В. Рыжков — М.: Горячая линия — Телеком, 2021. — 270 с.

164. *Саенко, И.Б.* Модель угроз ресурсам ИТКС как ключевому активу критически важного объекта инфраструктуры / О.С. Лаута, И.Б. Саенко, М.А. Карпов, А.М. Крибель // *Электросвязь*. — 2021. — № 1. — С. 36–44.
165. *Саенко, И.Б.* Модель угроз систем поддержки принятия решений, функционирующих на основе элементов искусственного интеллекта / О.С. Лаута, И.Б. Саенко, Н.А. Васильев, К.В. Крибель // *Электросвязь*. — 2022. — № 5. — С. 33–38.
166. *Саенко, И.Б.* Обобщенный профиль защиты телекоммуникационного оборудования, устойчивого к угрозам информационной безопасности / О.С. Лаута, И.Б. Саенко, С.Л. Лебедев, С.К. Мустановый [и др.] // *Электросвязь*. — 2024. — № 2. — С. 2–7.
167. *Советов, Б.Я.* Моделирование систем: учеб. для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. — М.: Высш. шк., 2001. — 343 с.
168. СП 244.1326000.2015. Кабельные линии объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.
169. Стандарт ETSI EN 300 462-6-1 V1.1.1 (1998-05). Общие требования для сетей синхронизации; Часть 6-1: Временные характеристики первичных эталонных генераторов.
170. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга), утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018. №769/р.
171. *Тарасенко, Ф.П.* Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем): учебник / Ф.П. Тарасенко. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. — 186 с.
172. *Тырсин, А.Н.* Векторное энтропийное моделирование многомерных стохастических систем / А.Н. Тырсин. — М.: Наука, 2022. — 231 с.
173. *Тырсин, А.Н.* Использование энтропийно-вероятностного моделирования в задачах мониторинга и управления сложными системами / А.Н. Тырсин, И.С. Соколова // *Современные технологии. Математика. Механика и машиностроение*. — 2012. — № 4(36). — С. 35–40.
174. *Тырсин, А.Н.* Исследование динамики многомерных стохастических систем на основе энтропийного моделирования / А.Н. Тыр-

- син, О.В. Ворфоломеева // Информатика и ее применения. — 2013. — Т. 7. — № 4. — С. 3–10.
175. *Тырсин, А.Н.* Оптимизационные задачи в энтропийном моделировании гауссовских стохастических систем / А.Н. Тырсин, И.С. Соколова // Вестник ТГУ. — 2015. — Т. 20. — № 5. — С. 1489–1492.
176. *Тырсин, А.Н.* Энтропийное моделирование сетевых структур / А.Н. Тырсин // Автоматика и телемеханика. — 2022. — № 10. — С. 144–155.
177. *Тырсин, А.Н.* Энтропийный подход к риск-анализу систем критичных инфраструктур / А.Н. Тырсин, А.А. Сурина // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции Секции естественных наук. — 2014. — С. 210–218.
178. Федеральный закон от 07.07.2003 № 126-ФЗ «О связи».
179. *Цветков, О.В.* Энтропийный анализ данных в физике, биологии, технике / О.В. Цветков — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. — 202 с.
180. *Шварц, М.Л.* Доставка эталонных сигналов времени и частоты на узлы оборудования сетей радиодоступа в присутствии помех / Д.К. Мазуренко, А.С. Фень, М.Л. Шварц // Электросвязь. — 2023. — № 10. — С. 16–21.
181. *Шварц, М.Л.* Имитационное моделирование влияния спуфинга в глобальных навигационных спутниковых системах с помощью программы «Моделирование TELECOMM» / Д.К. Мазуренко, Д.А. Пальцин, А.С. Фень, М.Л. Шварц // Электросвязь. — 2023. — № 11. — С. 62–66.
182. *Шварц, М.Л.* Имитационное моделирование девиации фазы выходного синхросигнала в зависимости от мощности опорного синхросигнала / Д.К. Мазуренко, Д.А. Пальцин, А.С. Фень, А.П. Горчаков, А.В. Федоров, М.Л. Шварц // Электросвязь. — 2024. — № 4. — С. 40–43.
183. *Шварц, М.Л.* Использование алгоритмов предсказания для подстройки частоты в случае прерывистого синхросигнала или перехода в режим удержания / Д.Кр. Мазуренко, А.С. Фень, М.Л. Шварц // Электросвязь. — 2024. — № 4. — С. 37–40.
184. *Шварц, М.Л.* Опорный узел формирования шкалы времени когерентной сети связи общего пользования / А.В. Рыжков,

- М.Л. Шварц, В.М. Аладин // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. — 2022. — Т. 12. — № 4. — С. 4–10.
185. *Шварц, М.Л.* Опыт внедрения систем частотно-временного обеспечения сетей связи / А.В. Рыжков, М.Л. Шварц, В.М. Аладин, А.В. Исупов // Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2022. — Т. 16. — № 7. — С. 21–28.
186. *Шварц, М.Л.* Перспективный первичный эталон времени и частоты для систем частотно-временного обеспечения сетей связи / А.В. Рыжков, М.Л. Шварц, В.М. Аладин // Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2022. — Т. 16. — № 8. — С. 12–20.
187. *Шубинский, И.Б.* Структурная надежность информационных систем. Методы анализа / И.Б. Шубинский. — Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2012. — 216 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Анализ предметной области функционирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени в составе телекоммуникационной системы ОАО «РЖД» | 8 |
| 1.1. Характеристика технологической сети связи ОАО «РЖД» | 8 |
| 1.2. Организационная структура Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» | 9 |
| 1.3. Технологическая структура Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» | 12 |
| 1.3.1. Кабельные линии связи в структуре Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» | 12 |
| 1.3.2. Цифровая первичная сеть связи в структуре Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» | 13 |
| 1.3.3. Высокоскоростная технологическая сеть передачи данных в структуре Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» | 17 |
| 1.3.4. Сеть технологической телефонной связи в структуре Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» | 20 |
| 1.3.5. Сети радиосвязи в структуре Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» | 22 |
| 1.3.6. Система управления сетью технологической связи Центральной станции связи — филиала ОАО «РЖД» | 23 |
| 1.4. Характеристика системы тактовой сетевой синхронизации ОАО «РЖД» | 25 |
| 1.5. Характеристика системы единого времени ОАО «РЖД» | 26 |
| Выводы по главе 1 | 28 |

| | |
|---|-----------|
| Глава 2. Формирование концептуальной модели комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 32 |
| 2.1. Подсистема тактовой сетевой синхронизации комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 32 |
| 2.1.1. Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи СЦИ | 35 |
| 2.1.2. Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи СЦИ и ПЦИ | 36 |
| 2.1.3. Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи синхронного <i>Ethernet</i> | 37 |
| 2.1.4. Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи СЦИ и синхронного <i>Ethernet</i> | 38 |
| 2.1.5. Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи <i>CWDM/DWDM</i> , обеспечивающих выполнение функций оптической транспортной сети <i>OTN</i> | 38 |
| 2.1.6. Построение подсистемы ТСС для сетей с пакетной коммутацией | 39 |
| 2.2. Подсистема единого времени комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 40 |
| 2.2.1. Формирование сетевой структуры подсистемы единого времени с использованием протокола <i>NTP</i> | 45 |
| 2.2.2. Формирование сетевой структуры подсистемы единого времени с использованием протокола <i>PTP</i> | 46 |
| 2.3. Сетевая модель комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 48 |
| 2.4. Существующие и перспективные потребители услуг комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 50 |
| 2.5. Внутренние и внешние дестабилизирующие факторы, воздействующие на комплексную систему синхронизации и доставки шкалы времени | 53 |
| 2.6. Построение концептуальной модели комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 57 |
| 2.7. Формирование сетевой структуры комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 59 |
| Выводы по главе 2 | 61 |

| | |
|--|------------|
| Глава 3. Модели процессов функционирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени в условиях дестабилизирующих воздействий организованного злоумышленника | 65 |
| 3.1. Описание возможных воздействий на комплексную систему синхронизации и доставки шкалы времени | 65 |
| 3.2. Имитационная модель процесса функционирования системы управления комплексной системой синхронизации и доставки шкалы времени при атаке организованного злоумышленника | 72 |
| 3.3. Полумарковская модель действий злоумышленника на начальном этапе реализации атаки на систему управления комплексной системой синхронизации и доставки шкалы времени | 84 |
| 3.4. Полумарковская модель действий злоумышленника при атаке на систему управления комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, реализующей угрозу перестроения ее структуры..... | 95 |
| 3.5. Полумарковская модель действий злоумышленника на завершающем этапе реализации атаки на систему управления комплексной системой синхронизации и доставки шкалы времени | 106 |
| Выводы по главе 3 | 117 |
| Глава 4. Методика оценки и управления устойчивостью комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов | 119 |
| 4.1. Оценка устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени..... | 119 |
| 4.2. Полумарковская модель процесса функционирования и восстановления сети ТСС | 121 |
| 4.3. Оценка коэффициента оперативной готовности комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 131 |

| | |
|---|------------|
| 4.4. Обобщенная модель действий злоумышленника при манипулировании сообщениями, содержащими сигналы частотно-временного обеспечения..... | 135 |
| 4.5. Обобщенная модель действий злоумышленника при реализации атаки спуфинга в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени..... | 151 |
| 4.6. Обобщенная модель действий злоумышленника при реализации DoS-атак в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени..... | 171 |
| 4.7. Обобщенная модель действий злоумышленника при ведении сетевой разведки с использованием инфраструктуры комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени..... | 188 |
| 4.6. Оценка устойчивости сети тактовой сетевой синхронизации в составе комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 202 |
| 4.7. Оценка дифференциальной энтропии комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени | 203 |
| 4.8. Обеспечение требуемой устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени путем управления значениями ее дифференциальной энтропии..... | 208 |
| Выводы по главе 4 | 216 |
| Заключение..... | 219 |
| Перечень принятых сокращений и наименований | 222 |
| Список источников..... | 226 |

Научное издание

Евгений Валерьевич Опарин

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ
СИСТЕМЫ ЧАСТОТНО-
ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ**

Монография

Оригинал-макет подготовлен в Издательском Центре РИОР

Подписано в печать 20.06.2025.

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Newton.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,5. Уч.-изд. л. 16,2.

Тираж 500 (I – 50) экз. Заказ № 00000

ООО «Издательский Центр РИОР»

127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В.

E-mail: info@riorp.ru <https://www.riorpub.com>