



УДК 621.39

## Имитационная модель процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E

Е. В. Опарин<sup>1</sup>, Ф. А. Прошин<sup>2</sup>, Е. В. Опарина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «Институт телекоммуникаций», Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, 5, корп. 5, лит. М

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Опарин Е. В., Прошин Ф. А., Опарина Е. В. Имитационная модель процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 503–515. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-503-515

### Аннотация

**Цель:** разработать имитационную модель синхронизации часов в соответствии с протоколом точного времени (Precision Time Protocol, RTP), функционирующим в режиме Ent-to-End (E2E). Исследовать влияние вероятностно-временных параметров функционирования сетевых устройств RTP на точность синхронизации. **Методы:** анализ результатов исследований отечественных и зарубежных авторов и технической документации, имитационное моделирование с применением агентного подхода. **Результаты:** разработана имитационная модель синхронизации локальной шкалы времени с учетом схемы «точка — точка» с применением прозрачных часов. Получена оценка точности синхронизации в зависимости от вероятностно-временных характеристик влияющих подпроцессов. **Теоретическая значимость:** разработанная модель позволяет получать оценки достигаемой точности синхронизации при функционировании протокола RTP в режиме E2E в зависимости от характеристик используемых устройств, а также от характеристик каналов связи. Данная модель расширяет теоретическую базу в области синхронизации телекоммуникационных сетей. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при проектировании относительно небольших пакетных сетей с поддержкой RTP, что актуально в условиях предприятий, внедряющих средства промышленной автоматизации, на объектах энергетического комплекса, а также в различных системах управления, включая телекоммуникации. Также разработанные модели могут быть использованы при анализе работоспособности функционирующих локальных сетей для поиска наиболее значимых подпроцессов, которые влияют на качество предоставления услуг пользователям. При необходимости модель может быть в дальнейшем масштабирована для применения на сетях более сложной топологии и стать основой для формирования комплекса моделей синхронизации шкал времени с использованием RTP в различных режимах работы.

**Ключевые слова:** сетевая синхронизация, RTP, протокол точного времени, E2E, частотно-временное обеспечение, шкала времени

### Введение

Протокол RTP представляет собой пакетно-ориентированный протокол, спроектированный для точной синхронизации распределенных часов с разрешением менее микросекунды и работающий в основном по Ethernet или IP.

Согласно стандарту IEEE Std 1588-2019 [1] протокол RTP обеспечивает точность синхронизации в сети выше 1 мкс (до 10 нс). Процесс функционирования протокола RTP основан на обмене сообщениями, передающими необходимую информацию в виде меток времени.

Функционирование протокола РТР может быть концептуально разделено на два этапа. На первом этапе устройства РТР логически самоорганизуются в иерархическое дерево синхронизации с использованием алгоритма ВМСА (Best Master Clock Algorithm). В сети связи устройства РТР постоянно обмениваются друг с другом качественными характеристиками своих внутренних часов. Устройство РТР с часами самого высокого качества в системе в конечном итоге берет на себя роль грандмастера (Grandmaster, GM) и выполняет функции источника времени для всей сети связи. На втором этапе осуществляется непрерывная передача меток времени от грандмастера вниз по иерархии устройств сети связи [1–4].

Протокол РТР поддерживает два механизма для расчета задержек в сети: сквозной (E2E) и одноранговый (Peer-to-Peer, P2P). Механизм

E2E требует, чтобы ведомое устройство измеряло общую задержку между собой и ведущим устройством. Механизм P2P, в свою очередь, требует, чтобы каждое устройство (включая коммутаторы и маршрутизаторы) на пути между ведущим и ведомым устройствами измеряло задержку между собой и своим непосредственным соседом. Общая сетевая задержка между ведущим и ведомым устройствами при этом равна сумме задержек канала на каждом участке и задержек на одноранговых устройствах на пути передачи. Синхронизация с использованием механизма E2E показана на рис. 1 [2, 5–8].

Фундаментальным допущением всех протоколов синхронизации, основанных на обмене временной информацией по сетям с неизвестными задержками распространения, является симметричная сетевая задержка между ведущим и ведомым устройствами.

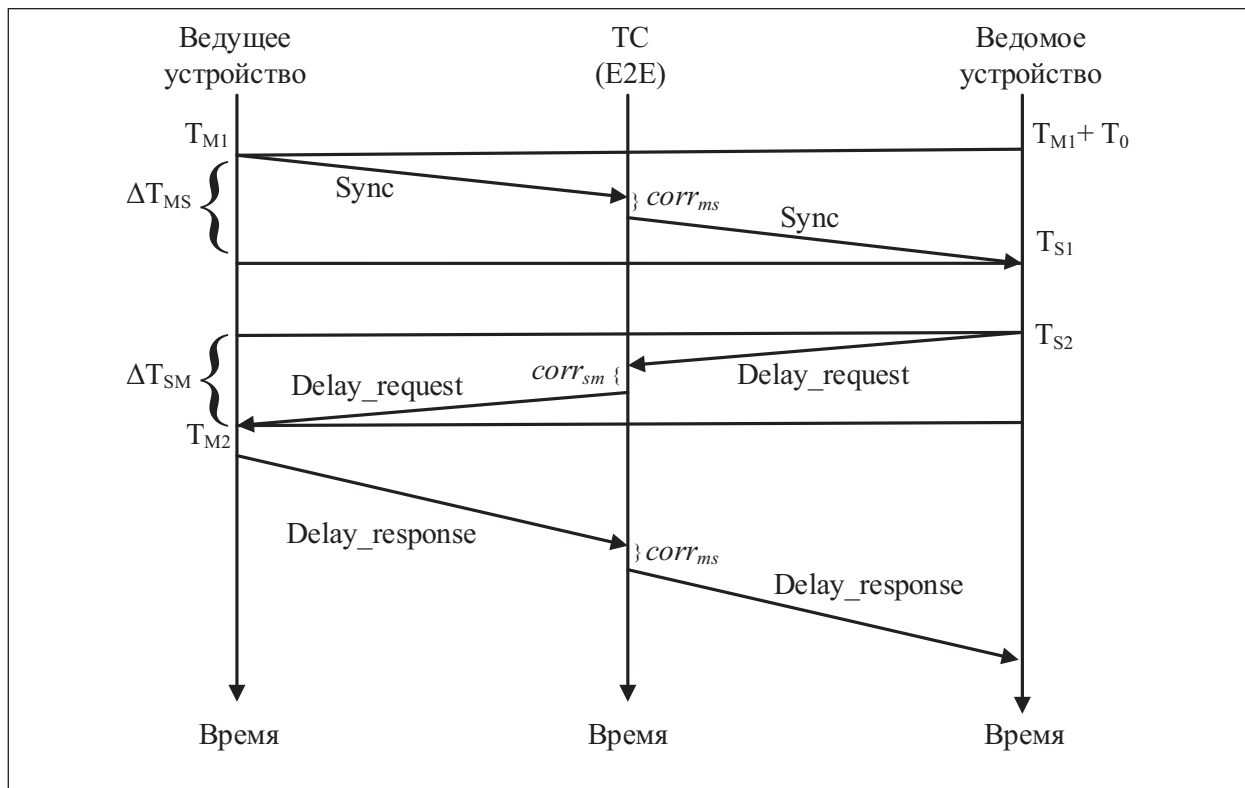


Рис. 1. Синхронизация с использованием механизма E2E

При использовании механизма E2E ведомое устройство вычисляет смещение своих часов по формулам (1, 2) и подстраивает свои часы в соответствии с вычисленным значением смещения [2, 9–12].

$$T_0 = T_s - T_M - d - \text{corr}_{ms}, \quad (1)$$

$$d = \frac{((T_{M2} - T_{M1}) - (T_{S2} - T_{S1})) - \text{corr}_{ms} - \text{corr}_{sm}}{2}, \quad (2)$$

где  $T_0$  — смещение ведомых часов относительно ведущих часов;

$T_M$  — время отправления сообщения “Sync”;

$T_S$  — время прибытия сообщения “Sync”;

$d$  — сетевая задержка между ведущим и ведомым устройствами;

$\text{corr}_{ms}$  — значение задержки, которую прозрачные часы добавляют в поле коррекции “correctionField” сообщения “Sync”;

$\text{corr}_{sm}$  — значение задержки, которую прозрачные часы добавляют в поле коррекции “correctionField” сообщения “Delay\_request”.

При функционировании протокола RTP можно выделить два источника асимметрии задержки: разница во времени обработки сообщений прозрачными часами и задержка, которая возникает из-за разницы в скорости передачи или маршруте передачи. Негативные последствия первого вида асимметрии могут быть устранены при должной настройке оборудования, однако влияние второго вида асимметрии компенсировать значительно сложнее.

Отметим, что в условиях значительного масштаба протяженных телекоммуникационных систем точность доставки сигналов единого времени на основе протокола RTP может снижаться, так как значительно возрастает вариация задержки — IP Packet Delay Variation (IPDV) [12–14].

### Построение имитационной модели процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E

В соответствии с процессом функционирования протокола RTP в режиме E2E (рис. 1) в среде AnyLogic была построена имитационная модель (рис. 2), где представлены ведущие

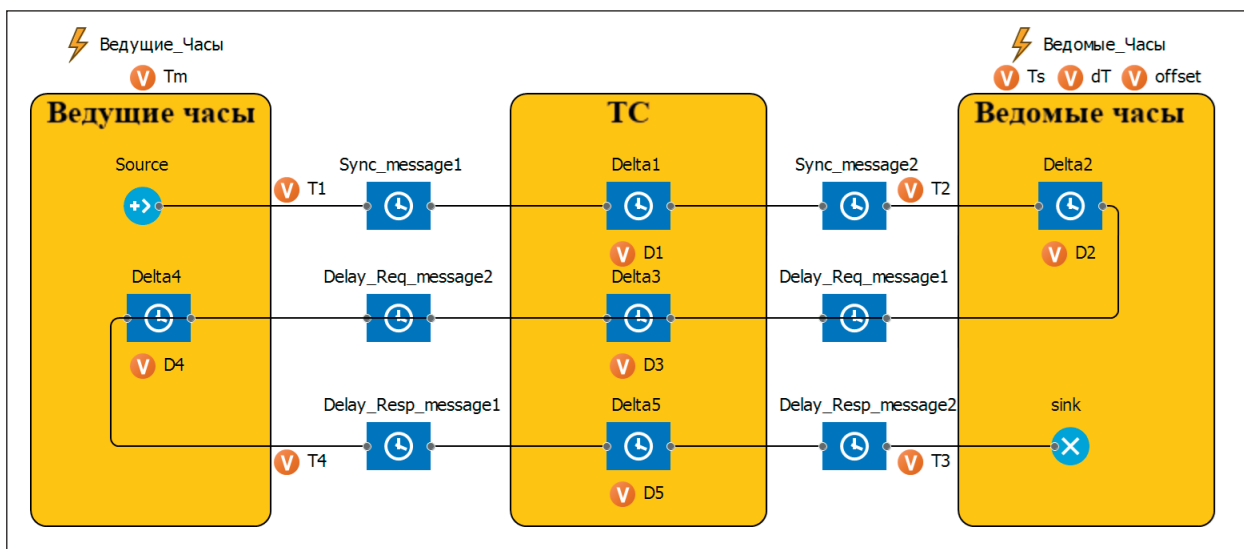


Рис. 2. Имитационная модель процесса функционирования протокола RTP с использованием механизма E2E

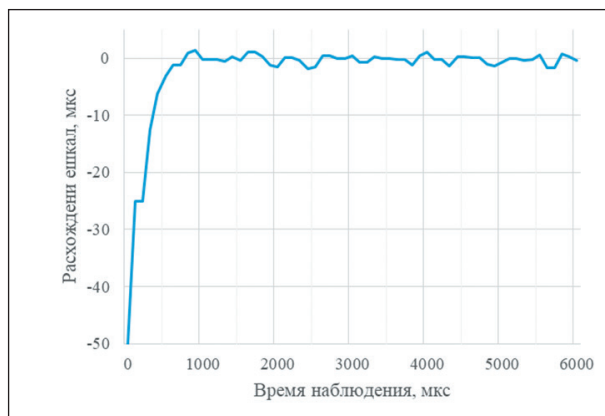
часы, ведомые часы и прозрачные часы (ТС), функционирующие в режиме E2E. Подстройка ведомых часов определяется отправкой и приемом сообщений “Sync”, “Delay\_request” и “Delay\_response”. Данные сообщения распространяются по каналу связи, представленному на имитационной модели блоками “Delay”. В общем случае задержки в каналах связи могут быть различными, а сам канал связи может быть симметричным или асимметричным. Обработка передаваемых сообщений в данных устройствах RTP и соответствующие ей задержки также представлены блоками “Delay”. Ведущие и ведомые часы характеризуются своей шкалой времени. Значения времени ведущих и ведомых часов отражаются в переменных  $T_m$  и  $T_s$ . Примем изначально, что ведомые часы опережают ведущие на 100 мкс [1, 2, 15]. Значение времени задержки обработки сообщений RTP задаются с помощью переменных D1, D2, D3, D4, D5. Назначение переменных T1, T2, T3, T4 — запись меток времени.

Для проведения моделирования примем, что канал связи является симметричным с нормальным распределением времени задержек

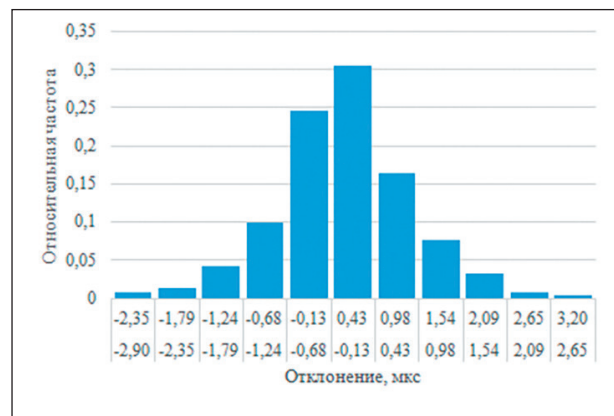
со следующими характеристиками (табл. 1). В результате проведенного моделирования получены следующие результаты (рис. 3–4).

По результатам проведенного моделирования построен график смещения ведомых часов от ведущих часов с учетом поправок по RTP, а также гистограмма отклонений показаний ведомых часов от показаний ведущих часов. График смещения ведомых часов относительно ведущих демонстрирует точность привязки локальной шкалы времени при функционировании протокола RTP в режиме E2E. Определено, что среднее смещение составляет  $T_0 = 0,064$  мкс, минимальное —  $T_{\min} = -3,947$  мкс (в данном случае ведомые часы спешат), а максимальное —  $T_{\max} = 4,17$  мкс (в данном случае ведомые часы отстают).

Разработанная имитационная модель процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E отличается учетом характеристик применяемых устройств и применяемых каналов связи и позволяет оценивать точность привязки шкал времени. Использование реальных исходных данных, взятых из практики эксплуатации сетей связи, позволит получить модель с реальными свойствами, производить оценку
















**Рис. 3.** Смещение ведомых часов от ведущих часов с учетом поправок по RTP



**Рис. 4.** Гистограмма отклонений показаний ведомых часов от показаний ведущих часов с учетом поправок RTP

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные для моделирования РТР в режиме E2E

Название состояния	Условное обозначение		Значение задержки, мкс
Инициирование цикла синхронизации	Source		—
Канал M_TC_1	Sync_message_1		Нормальный закон распределения с параметрами: $\delta = 0,5$ ; $\mu = 10$
Канал TC_M	Delay_Req_message_2		
Канал M_TC_2	Delay_Resp_message_1		
Задержка времени TC1	Delta_1		Экспоненциальный закон распределения с параметром $\lambda = 1$
Задержка времени TC2	Delta_3		
Задержка времени TC3	Delta_5		
Канал TC_S_1	Sync_message_2		Нормальный закон распределения с параметрами $\delta = 0,5$ ; $\mu = 8$
Канал S_TC	Delay_Req_message_1		
Канал TC_S_2	Delay_Resp_message_2		
Задержка времени S	Delta_2		Экспоненциальный закон распределения с параметром $\lambda = 1$
Задержка времени M	Delta_4		
Завершение цикла синхронизации	Sink		—

**Примечание:** экспоненциальный закон с параметрами ( $\lambda$ ; min) в AnyLogic следует понимать как случайную величину, распределенную по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda$ , функция распределения которой смещена на величину min от начала координат.

и прогнозировать точность привязки шкал времени на реальных сетях связи, а при наложении нормативных требований на точность привязки обоснованно формировать предложения по составу и характеристикам применяемого оборудования.

### **Оценка процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E от характеристик каналов связи, выраженных через вероятностные распределения времени задержек**

Построенная модель (рис. 2) позволяет проводить оценку влияния качества и характеристик каналов связи на процесс функционирования протокола RTP. Для оценки влияния качества и характеристик каналов связи на процесс функционирования протокола RTP была проведена серия экспериментов при различных параметрах распределений времени задержки в каналах связи и на оборудовании [1, 2, 15]:

$\sigma_1 = 1$ ;  $\sigma_2 = 1,5$ ;  $\sigma_3 = 2,5$  (эксперимент 1, 2, 3);  
 $\lambda_1 = 0,5$ ;  $\lambda_2 = 2$ ;  $\lambda_3 = 5$  (эксперимент 4, 5, 6).

Характеристики каналов связи заданы в соответствии с исходными данными согласно табл. 2. По итогам моделирования были получены следующие результаты (рис. 5–7). Оценка проводилась путем многократной итерации исходного эксперимента.

Сравнение результатов экспериментов по оценке влияния качества и характеристик каналов связи на процесс функционирования протокола RTP в режиме E2E приведено в табл. 3.

При исследовании канала с нормальным распределением задержки (рис. 5) показано: при  $\sigma = 1$  точность находится в пределах 1,2 мкс, а с увеличением до значения  $\sigma = 2,5$  достигает 6 мкс, что неприемлемо с точки зрения требований большинства потребителей. Канал с экспоненциальным распределением (рис. 6) на

множестве рассматриваемых значений параметра  $\lambda$  также оказывает влияние на достигаемую точность синхронизации, например, при  $\lambda = 2$  наблюдается наименьшее отклонение — менее 1 мкс. Следовательно, чем более «тяжелый» хвост наблюдается у кривой распределения, тем меньшая точность достигается.

На гистограммах распределения точности синхронизации (рис. 7) показано, что отклонение часов, в общем, носит одномодальный характер и стремится к нормальному закону. Также можно заметить, что математическое ожидание находится вблизи нулевой отметки, но среднеквадратическое отклонение (СКО) меняется в широких пределах, что в конечном итоге сказывается на точности синхронизации. Например, в эксперименте 5 наблюдается более явная мода и наименьшее СКО, в результате чего достигаемая точность (рис. 6) наиболее высока в данной серии экспериментов. Относительно экспериментов 1, 2, 3 аналогично видно, что в соответствии с гистограммой рис. 7а точность при  $\sigma = 1$  получается наибольшей.

Построенная модель может быть применена на реальных сетях связи для оценки отклонения показаний ведомых часов от показаний ведущих часов с учетом поправок RTP при наличии информации об используемых каналах связи. При этом полученные результаты позволяют дать оценку закона распределения отклонения шкалы ведомых часов от ведущих. При помощи варьирования параметров распределения задержки в канале возможно смоделировать условия различной загруженности канала, что имеет большое значение в условиях современных телекоммуникационных сетей.

Имея в наличии информацию о распределении времени задержек в каналах связи, которая может быть получена из статистики по

ТАБЛИЦА 2. Исходные данные для проведения оценки влияния качества и характеристик каналов связи на процесс функционирования протокола RTP в режиме E2E












Название состояния	Условное обозначение		Значение задержки в каналах связи, мкс						
			эксперимент 1	эксперимент 2	эксперимент 3	эксперимент 4	эксперимент 5	эксперимент 6	
Канал M_TC_1	Sync_message_1		normal (1; 10)			normal (1; 10)			
Канал TC_M	Delay_Req_message_2		normal (1,5; 10)	normal (2,5; 10)					
Канал M_TC_2	Delay_Resp_message_1								
Задержка времени TC1	Delta_1								
Задержка времени TC2	Delta_3								
Задержка времени TC3	Delta_5								
Канал TC_S_1	Sync_message_2		normal (1; 8)	normal (1,5; 8)	normal (2,5; 8)				
Канал S_TC	Delay_Req_message_1								
Канал TC_S_2	Delay_Resp_message_2								
Задержка времени S	Delta_2								
Задержка времени M	Delta_4								

ТАБЛИЦА 3. Сравнение результатов экспериментов

Вид распределения времени задержки в каналах связи	Отклонение показаний ведомых часов от показаний ведущих часов с учетом поправок РТР, мкс			
	минимальное	среднее	максимальное	СКО
Эксперимент 1	-3,947	0,064	4,170	1,197
Эксперимент 2	-5,092	0,092	4,489	1,514
Эксперимент 3	-6,904	0,546	7,432	2,307
Эксперимент 4	-5,894	0,108	6,315	1,432
Эксперимент 5	-1,970	0,030	2,090	0,600
Эксперимент 6	-1,730	0,030	1,490	0,510

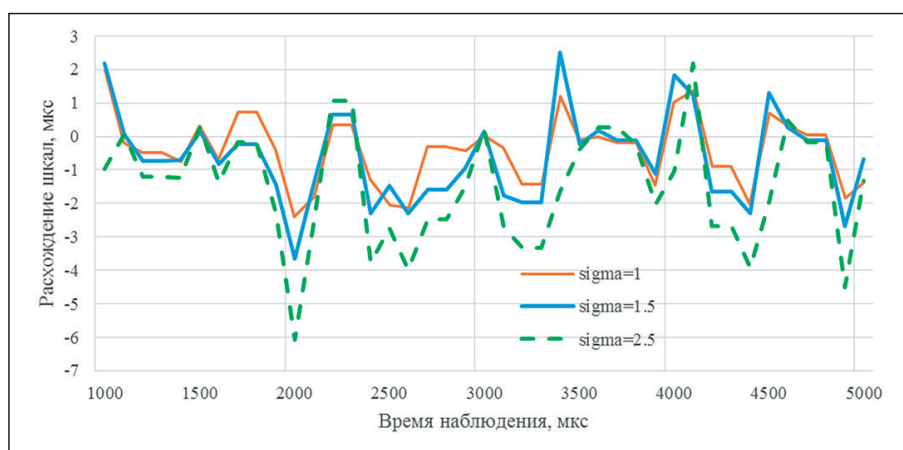


Рис. 5. Расхождение локальных шкал времени ведущих и ведомых часов по результатам экспериментов 1, 2, 3

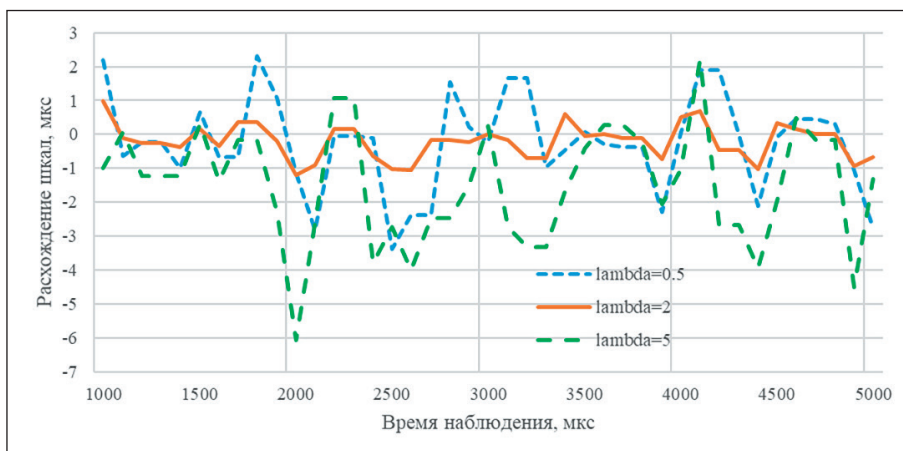
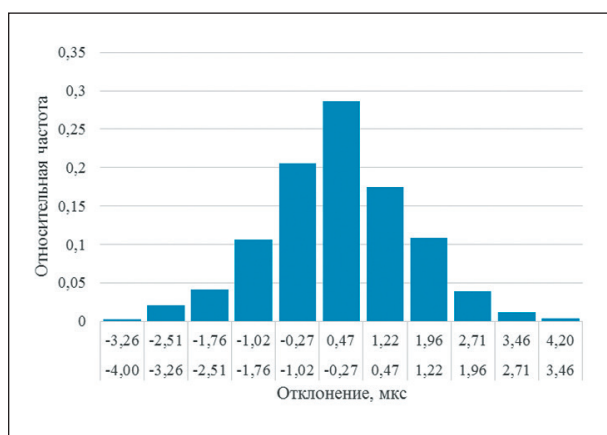
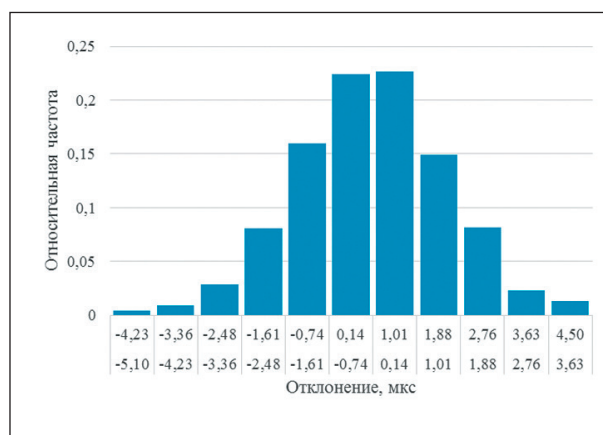


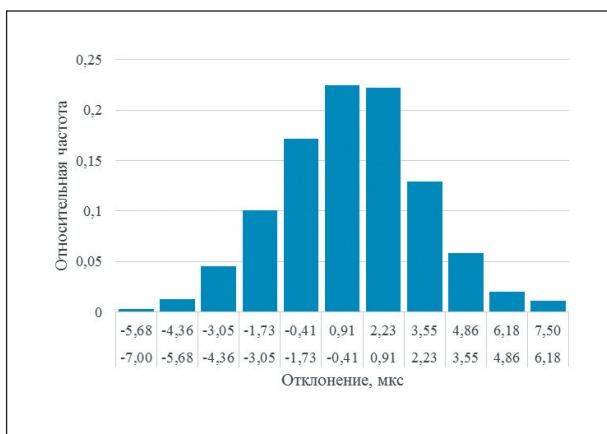
Рис. 6. Расхождение локальных шкал времени ведущих и ведомых часов по результатам экспериментов 4, 5, 6



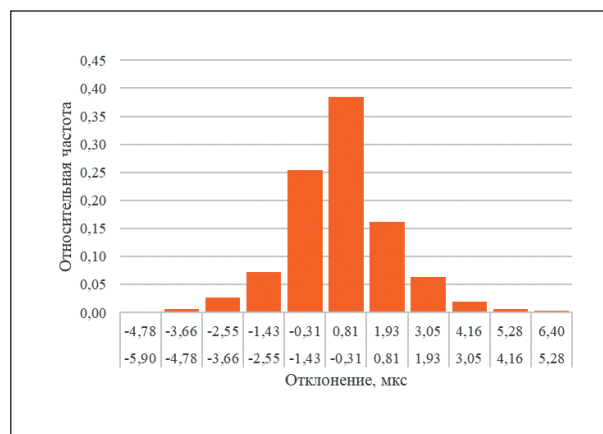
а) эксперимент 1



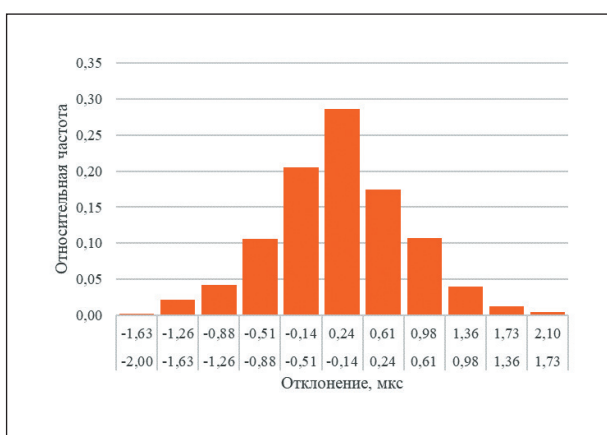
б) эксперимент 2



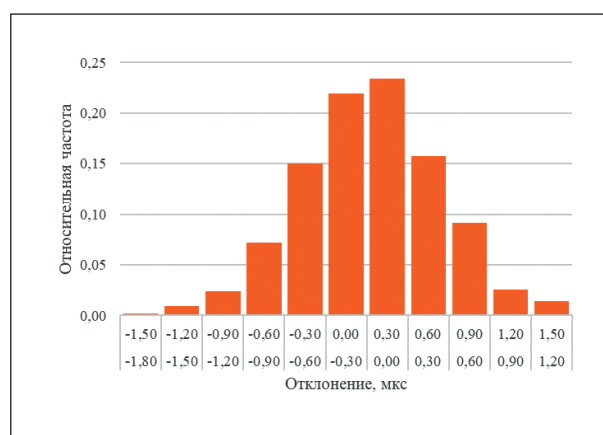
в) эксперимент 3



г) эксперимент 4



д) эксперимент 5



е) эксперимент 6

Рис. 7. Гистограммы отклонений показаний ведомых часов от показаний ведущих часов с учетом поправок РТР

технической эксплуатации, возможно оценить вариацию задержки передачи меток времени на реальных сетях связи. Это важно по двум причинам: моделирование показало, что при разных распределениях отклонение показаний ведомых часов от показаний ведущих часов существенно различается, а наличие длинных цепочек распределения шкал времени требует суммирования времени задержек, что и приведет к существенной ошибке предварительных оценок, если не учтено распределение времени задержки в канале связи.

Также возможно решить обратную задачу: исходя из требований ко времени отклонения показаний ведомых часов можно предъявить требования к каналам связи, в том числе и распределению времени задержек, чтобы отклонение показаний ведомых часов не превышало заданное.

### **Заключение**

В данной статье разработан комплекс имитационных моделей процесса функционирования протокола РТР в режиме E2E, позволяющих оценить качество синхронизации ведомых часов. В качестве критерия эффективности процесса функционирования протокола РТР было выбрано время отклонения показаний ведомых часов от показаний ведущих часов.

Для оценки отклонения показаний ведомых часов от показаний ведущих часов был проведен ряд экспериментов при различных распределениях времени задержек в каналах связи и времени обработки сообщений в устройствах (нормальное и экспоненциальное), который показал, что наибольший разброс отклонений наблюдается при нормальном распределении времени задержек.

Построенные модели могут быть применены на реальных сетях связи для оценки откло-

нения показаний ведомых часов от показаний ведущих часов при наличии информации об используемых каналах связи и времени задержек в устройствах.

Имея в наличии информацию о распределении времени задержек в каналах связи и используемых устройствах, возможно оценить отклонение показаний ведомых часов на реальных сетях связи. Также возможно решить обратную задачу, которая заключается в том, что исходя из требований ко времени отклонения показаний ведомых часов можно предъявить требования к каналам связи и к применяемым устройствам, чтобы отклонение времени не превышало заданное.

Моделирование процесса функционирования протокола РТР необходимо для изучения его эффективности и особенностей его функционирования в различных приложениях, где требуется точная синхронизация времени. Построенные модели позволяют оценить, как работает протокол РТР в различных условиях, что может быть актуально для разработки и оптимизации систем, требующих точной синхронизации времени. Например, при разных распределениях времени задержек в каналах связи и в применяемых устройствах отклонение показаний ведомых часов может существенно различаться, что накладывает ограничение на построение длинных цепочек распределения шкал времени.

### **Список источников**

1. IEEE 1588-2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
2. Waldhauser S., Jaeger B., Helm M. Time Synchronization in Time-Sensitive Networking // Network Architectures and Services. 2020. Pp. 51–56.
3. Dhiman D. C. NextGen Network Synchronization. Springer, 2021. 175 p.

4. Research on High-accuracy Clock Synchronization Based on IEEE 1588 Protocol / F. Shan [et al.] // 2019 IEEE 7<sup>th</sup> International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). 2019. Pp. 343–347.
5. An Enhanced Method for Nanosecond Time Synchronization in IEEE 1588 Precision Time Protocol / F. Li [et al.] // Processes. 2023. Vol. 11 (5). P. 17.
6. Novel Re-synchronization Circuit to Enable High-Accuracy PTP Timestamping / C. A. Shao [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024. P. 9.
7. Рыжков А.В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия — Телеком, 2021. 270 с.
8. Рыжков А. В., Шварц М. Л., Лоховин В. А. Перспективные направления развития систем связи и синхронизации сложных инфраструктурных объектов // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2024. Т. 18, № 11. С. 30–37.
9. Рыжков А. В., Шварц М.Л. Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2020. Т. 14, № 2. С. 17–24.
10. Опарин Е.В. Функционирование системы частотно-временного обеспечения железнодорожного транспорта в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. М.: РИОР, 2025. 248 с.
11. Мазуренко Д.К. Аспекты построения системы частотно-временной сетевой синхронизации сигналов // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2017. Т. 11, № 8. С. 4–8.
12. Мазуренко Д.К., Пальцин Д.А., Фень А.С. Эксплуатация оборудования системы синхронизации сигналов в сетях, построенных на технологии коммутации пакетов, и в сетях 5G // Электросвязь. 2022. № 12. С. 14–17.
13. Опыт внедрения систем частотно-временного обеспечения сетей связи / М. Л. Шварц [и др.] // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2022. Т. 16, № 7. С. 21–28.
14. Прошин, Ф.А., Сторожук М. Н., Сторожук Н.Л. Методы синхронизации в сетях связи // Первая миля — last mile. 2024. № 2 (118). С. 62–69.
15. Бунцев И.А. Создание и реализация имитационных моделей в программной среде AnyLogic. М.: Горячая линия — Телеком, 2016. 154 с.

Дата поступления: 30.01.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

#### Контактная информация:

ОПАРИН Евгений Валерьевич — кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрическая связь»; [Oparin@mail.ru](mailto:Oparin@mail.ru)

ПРОШИН Федор Алексеевич — кандидат техн. наук, ассистент; [fedorproshin@gmail.com](mailto:fedorproshin@gmail.com)

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — кандидат техн. наук, доцент; [syrayaekaterina@mail.ru](mailto:syrayaekaterina@mail.ru)

## Simulation Model of the PTP Protocol Operation in E2E Mode

**E. V. Oparin<sup>1</sup>, F. A. Proshin<sup>2</sup>, E. V. Oparina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> JSC “Institute of Telecommunications”, lit. M, build. 5, 5 Kantemirovskaya str., St. Petersburg, 194100, Russia

<sup>2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Oparin E. V., Proshin F. A., Oparina E. V. Simulation model of the PTP protocol operation in E2E mode // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 503–515. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-503-515 (In Russian)

## Abstract

**Purpose:** to develop a simulation model of clock synchronization in accordance with the Precision Time Protocol (PTP) functioning in «End-to-End» (E2E) mode. To investigate the influence of probabilistic-temporal parameters of network devices operation on synchronization accuracy. **Methods:** an analysis of foreign and Russian authors' works and technical documentation, simulation modeling using an agent-based approach. **Results:** a simulation model of local time scale synchronization via PTP with transparent clock is developed. An estimation of synchronization accuracy are obtained depending on the influencing subprocesses. **Theoretical significance:** the developed model makes it possible to obtain the estimation of the achieved synchronization accuracy when PTP is operating in E2E mode depending on the characteristics of the devices that are used, as well as on the characteristics of the communication channels. **Practical significance:** the obtained results can be used for designing relatively small packet networks with PTP support that is relevant in the context of implementing industrial automation tools at enterprises. The developed models can also be used for analyzing the operability of local area networks functioning to find the most significant subprocesses that affect the provisioned to users quality of service. The model can be further scaled for implementing in networks with more complicated topology and become a basis for complex of synchronization models of PTP working in different modes.

**Keywords:** Network synchronization, PTP, precision time protocol, E2E, frequency-time provision, time scale

## References

1. IEEE 1588-2019 (07.11.2019). Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
2. Waldhauser S., Jaeger B., Helm M. Time Synchronization in Time-Sensitive Networking, Network Architectures and Services, 2020, pp. 51–56.
3. Dhiman D.C. Next Gen Network Synchronization, Springer, 2021, 175 p.
4. Shan F., et al. Research on High-accuracy Clock Synchronization Based on IEEE 1588 Protocol, 2019 *IEEE 7th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 2019, pp. 343–347.
5. Li F, et al. An Enhanced Method for Nanosecond Time Synchronization in IEEE 1588 Precision Time Protocol, *Processes*, 2023, vol. 11 (5), p. 17.
6. Shao C., Xu Zh., Harihara S.A. Novel Resynchronization Circuit to Enable High-Accuracy PTP Timestamping, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, p. 9.
7. Ryzhkov A.V. Chastotno-vremennoe obespechenie v setyakh elektrosvyazi: uchebnoe posobie dlya vuzov [Time-Frequency Support in Telecommunication Networks: A Textbook Handbook for Universities], Moscow, Hotline – Telecom, 2021, 270 p. (In Russian)
8. Ryzhkov A. V., Schwartz M. L., Lokhovin V.A. Perspektivnye napravleniya razvitiya sistem svyazi i sinkhronizatsii slozhnykh infrastrukturykh ob"ektov [Promising Directions for the Development of Communication Systems and Synchronization of Complex Infrastructure Facilities], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2024, vol. 18, no. 11, pp. 30–37. (In Russian)
9. Ryzhkov A. V., Schwartz M. L. Puti formirovaniya pretsizionnoj shkaly vremeni natsional'noj seti svyazi [Ways Formation of the Precision Time Scale of the National Communications Network], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 17–24. (In Russian)
10. Oparin E. V. Funktsionirovanie sistemy chastotno-vremennogo obespecheniya zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh vozdeystviya destabiliziruyushchikh faktorov [Functioning of the System of Frequency-Time Support of Railway Transport Under the Influence of Destabilizing

Factors], Moscow, RIOR Publishing Center LLC, 2025, 248 p. (In Russian)

11. Mazurenko D.K. Aspekty postroeniya sistemy chastotno-vremennoj setевой sinkhronizatsii signalov [Aspects of Building a Time-Frequency Network Signal Synchronization System], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2017, vol. 11, no. 8, pp. 4-8. (In Russian)

12. Mazurenko D.K., Paltsin D.A., Fen' A.S. Ekspluatatsiya oborudovaniya sistemy sinkhronizatsii signalov v setyakh, postroennykh na tekhnologii kommutatsii paketov, i v setyakh 5G [Operation of Signal Synchronization System Equipment in Networks Based on Packet Switching Technology and in 5G Networks], *Elektrosvyaz' [Electrosvyaz Magazine]*, 2022, no 12, pp. 14–17. (In Russian)

13. Ryzhkov A.V, et al. Opyt vnedreniya sistem chastotno-vremennogo obespecheniya setej svyazi [Experience in Implementing Systems Time-Frequency Support of Communication Networks], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm – Telecommunications and Transport]*, 2022, vol. 16, no. 7, pp. 21–28. (In Russian)

14. Proshin, F. A., Storozhuk M. N., Storozhuk N.L. Metody sinkhronizatsii v setyakh svyazi [Methods of Synchronization in Communication Networks], *Pervaya milya — last mile [The First Mile — Last Mile]*, 2024, no. 2 (118), pp. 62–69. (In Russian)

15. Buntsev I.A. Sozdanie i realizatsiya imitatsionnykh modelej v programmnoj srede AnyLogic [Creation and Implementation of Simulation Models in the Anylogic Software Environment], Moscow, *Goryachaya liniya — Telekom [Hotline – Telecom]*, 2016. 154 p. (In Russian)

Received: January 30, 2026

Accepted: March 04, 2026

**Author's information:**

Evgeny V. OPARIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Electrical Communications”; OnapuH@mail.ru

Fedor A. PROSHIN — PhD in Engineering, Assistant; fedorproshin@gmail.com

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