

Научная статья

УДК 621.391

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-34-47



# Моделирование процесса обработки меток времени на устройствах транспортной сети

- Андрей Константинович Канаев, kanaevak@mail.ru
- Елена Владимировна Казакевич, kev-pgups@yandex.ru
- Мария Александровна Сахарова, maryazuvaka@mail.ru
- Федор Алексеевич Прошин ✉, fedorproshin@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,  
Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация

**Аннотация:** Современные телекоммуникационные сети строятся на основе различных технологий передачи и обработки данных. Большая нагрузка на узлы транспортного уровня требует обеспечения качественной синхронизации расположенного на них оборудования. Транспортная сеть выступает в качестве важного элемента, передающего шкалу времени на ведомые устройства. Использование принципов временного мультиплексирования и обработки высокоскоростных потоков с разделением по длине волны (OTN, аббр. от англ. Optical Transport Network) и классических сетей на основе Ethernet в качестве системы транспортного уровня требует наличия точного временного согласования, что может обеспечиваться при поддержке функций работы по протоколу точного времени (PTP, аббр. от англ. Precision Time Protocol). Предлагается аппарат моделирования процессов обмена пакетами, которые содержат сообщения PTP, на уровне мультиплексоров OTN и участке транспортной IP-подсети, построенной на маршрутизаторах. Процесс прохождения пакетов по сети рассмотрен с точки зрения базовых процессов обработки. Рассмотрено влияние нагрузки в сети на скорость обработки пакетов на маршрутизаторах и эффективность применения алгоритмов упреждающего кодирования (Forward Error Correction) на быстродействие мультиплексоров OTN. Приведены экспериментальные данные по распределению задержек и дана оценка асимметрии на оборудовании при различных условиях функционирования.

**Ключевые слова:** оптическая транспортная сеть, OTN, транспортная сеть Ethernet, уровень агрегации, обработка PTP, задержка обработки, сетевая синхронизация, алгоритм Forward Error Correction

**Ссылка для цитирования:** Канаев А.К., Казакевич Е.В., Сахарова М.А., Прошин Ф.А. Моделирование процесса обработки меток времени на устройствах транспортной сети // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 34–47. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-34-47. EDN:JCNBES

## Modelling of Timestamp Processing within Transport Network Equipment

- Andrey Kanaev, kanaevak@mail.ru
- Elena Kazakevich, kev-pgups@yandex.ru
- Maryia Saharova, maryazuvaka@mail.ru
- Fedor Proshin ✉, fedorproshin@gmail.com

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
St. Petersburg, 190031, Russian Federation

**Abstract:** The modern telecommunication networks are forming on the basis of different transmission and data processing technologies. High load on the transport layer nodes demands quality synchronization of equipment that

works on it. The transport network is an important element which delivers the time scale to slave nodes. Using the time-division multiplexing for the high-speed channel processing with the use of wavelength division multiplexing (OTN, Optical Transport Network,) and classic Ethernet networks as a transport layer systems needs the precision time synchronization which can be achieved with the use of Precision Time Protocol (PTP). The modeling apparatus of PTP messages exchanging within OTN multiplexers and IP-network based on the routers are suggested. The packet transferring through the network are given as sequence of simple processing steps. The impact of a network load on PTP information processing capacity on the routers and efficiency of the Forward Error Correction algorithm for OTN equipment are analyzed. The experimental distribution of variable delays on that network elements are given.

**Keywords:** optical transport network, OTN, Ethernet transport network, aggregation layer, PTP processing, processing delay, network synchronization, Forward Error Correction

**For citation:** Kanaev A., Kazakevich E., Saharova M., Proshin F. Modelling of Timestamp Processing within Transport Network Equipment. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(2):34–47. (In Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-34-47. EDN:JCNBES

## 1. Введение

В настоящее время нагрузка на телекоммуникационные сети постоянно увеличивается, предъявляются более высокие требования к качеству обслуживания и предоставляемых услуг. Надежное функционирование оборудования на узлах, обеспечивающих стабильную работу сетей, распределенных на большой территории, возможно при наличии привязанной шкалы времени на каждом элементе. Потребителями синхронизации выступают различные системы и комплексы, каждый из которых требует определенной точности. Сети сотовой связи стандартов LTE и 5G, системы управления электроэнергетическими объектами, различные сервисы реального времени наиболее требовательны к точности синхронизации. Рост популярности пакетных систем, гетерогенность сетей требуют методов синхронизации, отличающихся от принципов построения системы тактовой сетевой синхронизации (ТСС). Тактовая синхронизация, которая подразумевает передачу на физическом уровне, характерна для традиционных сетей с временным разделением каналов. На сетях с коммутацией пакетов частотная синхронизация может быть реализована на физическом уровне или с использованием однонаправленного или двунаправленного протокола. Но указанные выше потребители, помимо частотной, нуждаются в фазовой и временной синхронизации, которые обеспечивают привязанные шкалы времени на узлах. Для достижения этого условия необходимо использование двунаправленного протокола, который позволяет учесть задержку доставки пакетов от ведущих к ведомым часам. Следует заметить, что временная синхронизация в сетях с пакетной коммутацией претерпевает трудности, обусловленные значительной вариацией задержек, зависимостью от загрузки сети, принципами маршрутизации и другими техническими особенностями оборудования и программных средств. Это обуславливает переменный характер задержек при доставке временных меток.

При рассмотрении OTN (аббр. от англ. Optical Transport Network, оптическая транспортная сеть) следует сказать, что согласно [1] физический уровень данной технологии не предназначен для переноса синхронизации. Выступая транспортом для существующих протоколов и технологий, OTN должна включать механизмы переноса информации о синхронизации. Следовательно, на уровне транспорта, а именно OTN, следует говорить о возможности переноса сообщений, используемых для привязки шкалы времени, с помощью соответствующих однонаправленных или двунаправленных протоколов. Таким образом, не предполагается использование физического уровня для переноса частоты, но определенные механизмы частотной, временной и фазовой синхронизации в данной области существуют.

Цель данной статьи – разработка модели функционирования двунаправленного протокола (в данной модели, как оговорено далее – протокола точного времени, PTP, аббр. от англ. Precision Time Protocol) в различных условиях: в составе сети, реализованной на принципах пакетной передачи IP/Ethernet, и внутри «острова OTN». Это позволит далее перейти к анализу работы двунаправленных протоколов в гетерогенной сети, включающей рассматриваемые подсети. При этом модель учитывает механизмы переноса меток времени в пакетной сети без поддержки PTP на канальном уровне и транспорта в рамках OTN без специализированных инструментов его обработки. Актуальность разработки обуславливается потребностью в оценке вероятностно-временных характеристик доставки пакетов PTP в зависимости от структуры оборудования для дальнейшего моделирования гетерогенной сети, ее сложности и протяженности.

## 2. Сетевая синхронизация и принципы обеспечения единой шкалы времени

Наличие синхронизации является необходимым условием функционирования телекоммуникационной сети. Так как на данное время существуют

различные технологии построения сети, методы доставки эталонных сигналов до устройств потребителей, в зависимости от сетевой архитектуры, соответственно, различаются. Понятие «синхронизация» в зависимости от рассматриваемой технологии построения может иметь разное содержание. Традиционная сеть ТСС, строящаяся на оборудовании СЦИ (*аббр. от* синхронная цифровая иерархия), характеризуется переносом частоты на физическом уровне. При таком подходе задача функционирования состоит в поддержании постоянства частоты на каждом узле, причем отклонения от номинального значения, вызываемые фазовыми искажениями, компенсируются с помощью схем фазовой автоподстройки частоты. Следовательно, для ТСС синхронизация есть постоянство частоты в сочетании с корректировкой фазовых искажений.

Для сетей с коммутацией пакетов аналогичный подход реализован в виде технологии «синхронного Ethernet» (SyncE, *аббр. от* англ. Synchronous Ethernet), которая позволяет обеспечить передачу синхронизации на физическом уровне при реализации пакетного метода передачи информации пользователей. Данный подход можно считать одним из вариантов переноса достоинств существующей системы ТСС на приобретающие популярность сети Ethernet. Следует сказать, что на данное время технология характеризуется полнотой нормативной базы, а стандартизация направлена на внесение, при необходимости, корректировок или уточнений. При высокой точности данного решения существуют сложности, которые ограничивают его применение.

Для функционирования сети, поддерживающей работу с SyncE, каждое устройство должно иметь соответствующие порты, обеспечивающие выделение сигнала синхронизации с физического уровня. На реальных сетях внедрение такой технологии предполагает замену действующего оборудования, что требует значительных вложений. Достоинствами SyncE можно назвать схожесть принципов доставки частоты с традиционной сетью ТСС, высокую стабильность и точность, позволяющую работать с приложениями реального времени, прослеживаемость сигналов по цепи от эталона (или источника более высокого качества) и использование аналогичных сообщений о качестве источника. Большой опыт построения сетей ТСС в части распределения генераторных и сетевых элементов и обеспечения надежности здесь также применим.

Следует заметить, что, обладая большими преимуществами по точности относительно показателей классической ее реализации [2], технология SyncE предполагает сложную техническую структуру, ограничивающую области ее применения и затрудняющую широкое распространение. Следовательно, техническая сторона модернизации требует

поиска дополнительных механизмов синхронизации пакетных сетей, обеспечивающих высокие показатели точности, но предполагающих минимальные изменения состава и структуры оборудования действующих сетей.

Так как технологии пакетной коммутации продолжают внедряться более активно по сравнению с традиционным временным разделением каналов, что определяется переносом транспортного уровня на оборудование, функционирующее на основе коммутации пакетов (в основном, на базе Ethernet), при решении задачи синхронизации следует говорить о методах согласования частоты, времени или фазы ведомых часов [2]. Соответственно, для достижения частотной синхронизации достаточно использовать однонаправленный протокол, а при необходимости фазовой, временной, то есть для привязки шкалы времени, требуется двунаправленный вариант. При этом необходимо учитывать принципы маршрутизации пакетов и зависимость их задержки от нагрузки в сети.

Вариация задержки пакетов (PDV, *аббр. от* англ. Packet Delay Variation), свойственная для таких систем, предполагает более сложный характер, чем дрожание (джиттер) и блуждание (вандер) фазы сигнала синхронизации физического уровня. Согласование временных шкал на устройствах обеспечивается переносом метки-запроса и соответствующей метки-ответа от устройств, участвующих в процессе синхронизации. Для высокоскоростных систем транспортного уровня и требовательных ко времени приложений необходимо использовать двунаправленные протоколы.

На данное время на пакетных сетях различного уровня, в зависимости от требований к точности, согласование шкал обеспечивается протоколом сетевого времени (NTP, *аббр. от* англ. Network Time Protocol) и RTP [3]. Создание NTP обусловлено необходимостью согласования шкал времени множества устройств, входящих в состав локальных вычислительных сетей и глобальной сети Интернет. Достижимая при использовании NTP точность до единиц-десятков миллисекунд достаточна для корректной работы устройств большого количества клиентов, систем тарификации, компьютерных подсетей. Простота его реализации при минимальных технических требованиях обуславливает широкое распространение.

При переносе функций транспорта на уровень пакетных сетей высокие требования к синхронизации возможно обеспечивать только с помощью RTP. Данный протокол имеет нормативную базу, которая характеризуется полнотой и стабильностью. Актуальная на данное время версия, известная как IEEE 1588v2.1, обеспечивает точность до единиц наносекунд при аппаратной реализации на устройствах.

Важно заметить, что при таком уровне стандартизации работа над его совершенствованием постоянно ведется различными международными организациями. Это можно заметить в отношении профилей, регулирующих функциональные возможности РТР для конкретной области (электроэнергетика, финансовая деятельность, телекоммуникации, мультимедиа и др.).

Как указано ранее, РТР строится на принципах обмена временными метками, которые передаются в составе соответствующих сообщений протокола. Метки времени соответствуют отсчетам по локальной шкале устройства, считываемых при отправке и приеме запросов. Двухнаправленность протокола обеспечивает учет задержки, которая необходима для прохождения от ведущего к ведомому, и в обратном направлении. На практике данные величины различны, что объясняется множеством условий, которые характерны для пакетных сетей. Наиболее распространенными причинами могут быть выбранный протокол маршрутизации, загруженность сетевого оборудования, нагрузка в сети и др.

Информация о времени передается с помощью соответствующих сообщений, частота пересылки которых (например, для РТР – от 1 до 128 в секунду) намного ниже частоты физического сигнала 2 МГц [4]. Такие сообщения должны отправляться через точные временные интервалы, которые на практике могут быть различными. Для его реализации (при невысоких требованиях по точности) достаточно использовать соответствующее программное обеспечение на стороне клиента и сервера, загружаемое в действующее оборудование потребителей.

Для использования в телекоммуникационных сетях с высокими требованиями по точности и минимальными задержками передачи требуется аппаратная реализация, при которой за обработку меток отвечают отдельные микроконтроллеры. При таком варианте минимизированы задержки, возникающие при чтении сообщений и формировании ответных запросов. Данные задержки служат источником возникновения асимметрии, которая значительно снижает точность подстройки ведомых часов.

### 3. Типы устройств на транспортном уровне

Технология OTN выступает наиболее оптимальным решением для построения транспортных сетей. Сочетание принципов волнового разделения каналов (WDM, *аббр. от англ. Wavelength Division Multiplexing*) с механизмами контроля и управления нагрузкой данных позволяет эффективно обрабатывать высокоскоростные потоки транспортного уровня. Важно заметить, что современные устройства OTN позволяют обрабатывать потоки данных (полезную нагрузку) на различных уровнях в зави-

симости от необходимости цифровой коммутации или выделения на уровень пользователя. Тип данных в выделенном потоке определяется технологией передачи нижнего уровня, а обработка блоков данных (ODU, *аббр. от англ. Optical Data Unit*) выполняется независимо от их содержания.

Так как существует множество действующих транспортных сетей на основе классических СЦИ, то при их модернизации с использованием OTN оборудование СЦИ рассматривается в качестве пользователя [1]. Развитие протоколов на основе Ethernet и механизмов снижения задержек, связанных с пакетной коммутацией, позволяет использовать принцип коммутации пакетов для доставки сервисов, требовательных ко времени, аналогично сетям СЦИ. Важным условием при этом выступает обеспечение точной шкалы времени на каждом узле, мультиплексоре OTN или маршрутизаторе. Наиболее оптимальным решением для этого можно назвать использование РТР, основанного на согласовании шкал времени между ведущим и ведомыми устройствами путем обмена соответствующими временными метками. На практике ведущие часы (Master) находятся вблизи первичного эталонного генератора, а ведомые устройства (Slave) располагаются на узловых станциях на значительном расстоянии. Следовательно, существуют трудности, связанные с реализацией алгоритма РТР из-за наличия большого количества элементов, вносящих асимметрию и снижающих точность синхронизации. Как указано ранее, каждый из типов указанных устройств (OTN и IP) в реальных сетях участвует в обмене сообщениями РТР, так как маршрут доставки пакетов до ведомого устройства может проходить по различным участкам. Рассмотрим процессы обработки меток времени, относящиеся к оборудованию OTN и маршрутизаторам транспортного уровня.

#### 3.1. Мультиплексор OTN

Так как транспортная сеть, как указано ранее, может строиться на оборудовании OTN, перенос меток времени должен обеспечиваться с минимальной вносимой асимметрией. Для исследования воздействия «островов OTN» [5] на временные искажения рассмотрим процессы обработки пакетов РТР элементами мультиплексора. Существуют несколько принципиальных методов доставки шкалы времени по пакетным сетям и системам OTN. Согласно [6–8], в пакетных сетях оборудование может поддерживать РТР, обрабатывая его данные отдельно от информационных потоков, или не поддерживать, обслуживая сообщения в общей очереди. На основании [1, 7] перенос меток времени для OTN возможен в качестве полезной нагрузки, содержащейся в блоках OPU (*аббр. от англ. Optical Payload Unit*), или по выделенному каналу в структуре заголовка OTUk (*аббр. от англ.*

Optical Transport Unit level  $k$ , оптический транспортный блок уровня  $k$ ).

Для моделирования предлагается один из вариантов переноса меток времени, основанный на переносе сообщений RTP в качестве элемента полезной нагрузки, что можно считать наименее эффективным с точки зрения достижимой точности применением. Рассмотрение вариантов с реализацией приоритетной обработки по каналу управления предполагается выполнить в последующей статье. При построении модели будем считать, что сформированное сообщение RTP размещается в пакете UDP (аббр. от англ. User Datagram Protocol, протокол пользовательских датаграмм). Далее полученный пакет вставляется в кадр IP, который передается на канальный уровень в состав кадра Ethernet в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 1.

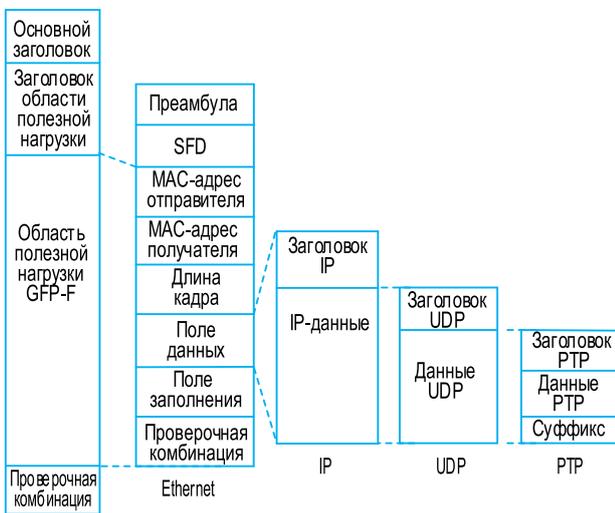


Рис. 1. Размещение сообщений RTP в кадре Ethernet

Fig. 1. Mapping of the RTP Messages in Ethernet Frame

Так как описание конкретных механизмов работы по RTP, сообщения которого размещаются в качестве данных пользователя, отсутствует в структуре основополагающих стандартов МСЭ-Т, будем считать, что сообщения RTP передаются в структуре данных 1 Gigabit Ethernet (1GE, гигабитный Ethernet) в качестве полезной нагрузки. Согласно [1] размещение данных с пакетной структурой обеспечивается, в общем, с помощью алгоритма общей процедуры размещения (GMP, аббр. от англ. Generic Mapping Procedure). Входной поток данных 1GE поступает на интерфейс пользовательского модуля. Так как линейная скорость потока 8B/10B равна 1,25 Гбит/с, то для размещения в OPU0 (аббр. от англ. Optical Payload Unit level 0 – оптический блок нагрузки уровня 0) требуется преобразование в поток меньшей скорости, которая составляет 1 171 875 Кбит/с (1,17 Гбит/с). Сформированные 8 октетов 64B/65B размещаются в общем суперблоке GFP-T (аббр. от англ. Transparent

Generic Framing Procedure – прозрачный режим общей процедуры формирования кадра). При использовании механизма GFP-T обеспечивается прозрачная передача нагрузки. При этом выполняется выравнивание скорости поступающего потока данных путем использования алгоритма GMP. Следовательно, сформированный поток данных соответствует скорости OPU0 и может размещаться в поле нагрузки.

Так как линейный интерфейс OTN позволяет передавать минимальный размер блока, соответствующий OTU1, то полученный ODU0 мультиплексируется до ODU1. На выходе мультиплексора появляется OTU1, который имеет постоянную линейную скорость и может передаваться на оптический модулятор. Мультиплексоры OTN на данное время содержат блок кросс-коммутации на уровне ODU, что позволяет обрабатывать транзитные соединения, не выделяя нагрузку от пользователя. Принятый линейный сигнал OTU1 преобразуется до ODU1, содержащего информацию о маршруте, после чего кросс-коммутатор перенаправляет данный ODU1 на соответствующий линейный интерфейс, где создается обновленный OTU1 для передачи на последующие узлы.

Механизм упреждающего корректирования ошибок (FEC, аббр. от англ. Forward Error Correction), выполняемый на этапе формирования OTU, может быть реализован на различных корректирующих кодах. Так как каждый из таких кодов вводит избыточность, это влияет на общее время обработки данных на устройстве. От количества дополнительной информации зависит способность обнаруживать и исправлять ошибки. Коды с высокой избыточностью и, следовательно, возможностью исправлять большее число ошибок, представляют собой важную составляющую систем передачи, функционирующих на протяженных волоконно-оптических линиях связи. Согласно данным [9], в зависимости от применяемого кода, избыточность может достигать 7–25 %. Применение различных кодов четко не регламентировано, что позволяет производителям разрабатывать собственные алгоритмы. На существующих системах OTN применяются циклические недвоичные коды Рида – Соломона (RS, аббр. от англ. Reed-Solomon) [1], имеющие наибольшее кодовое расстояние.

Прием данных на оконечном мультиплексоре выполняется в обратном порядке. Полученный OTU1 после скремблирования и расформирования до ODU1 поступает на соответствующий модуль пользовательского интерфейса. Считанные данные о маршруте из заголовка ODU1 OH (аббр. от англ. OverHead) указывают на необходимость демultipлексирования блока ODU1 до нижнего уровня ODU0. Здесь данные заголовка ODU0 OH используются для целей управления и контроля и об-

работываются отдельными контроллерами. Полезная нагрузка OPU выделяется в соответствии с GMP, обеспечивающим на выходе поток кадров GFP-T. Выполняется выделение суперблоков GFP, содержащих октеты перекодированного в 8B/10B сигнала 1GE. После восстановления изначального кода поток данных подается на интерфейс пользователя 1GE.

### 3.2. Маршрутизатор IP-сети

При использовании маршрутизаторов в качестве оборудования транспортной системы необходимо учесть пропускную способность портов и зависимость производительности данного типа оборудования от величины нагрузки. Предлагается рассмотреть маршрутизатор уровня ядра сети или агрегации. Данный тип устройств должен обеспечивать обработку высокоскоростных потоков данных, поступающих на каждый из его интерфейсов, с минимальными задержками. Современные маршрутизаторы оснащаются отдельными модулями обработки RTP с целью минимизации длительности пересылки меток между портами.

Рассматриваемый маршрутизатор в качестве линейных портов использует оптические интерфейсы 10GE (10-гигабитный Ethernet). Потоки данных от пользователей (нижестоящего оборудования) подаются на электрические интерфейсы 1GE. Пользовательские потоки представляют собой последовательность пакетов Ethernet, прибывающих в произвольном порядке. При этом считаем, что линейные интерфейсы функционируют без учета приоритетов трафика, то есть обрабатывают поступающие пакеты в общем порядке.

При поступлении на входной интерфейс 1GE поток данных преобразовывается с физического сигнала в соответствующий код, используемый структурой маршрутизатора. После преобразования считанные заголовок и CRC (*аббр. от англ. Cyclic Redundancy Check* – циклический избыточный код) анализируются. Далее выполняется выделение заголовка IP, и данные пользователя со считанным заголовком под временными внутренними адресами через плату коммутации передаются в буфер выходного порта. Здесь выполняется обратное преобразование, в соответствии с которым по временным внутренним адресам собирается пакет IP, его заголовок, определяется порядок следования пакетов с выходного порта, показатели качества (QoS, *аббр. от англ. Quality of Service*) и, при необходимости, другие параметры. После этого на уровне РНУ (*аббр. от англ. Physical layer* – физический уровень) генерируется пакет Ethernet, предполагаемый к отправке на выходной интерфейс в виде физического сигнала. Более подробно процессы, связанные с обработкой пакетов, можно найти в [10].

Для рассматриваемой модели будем считать, что процессы обработки пакетов Ethernet на входном маршрутизаторе, получающем их от пользователя, на промежуточном – расположенном в транзитном узле, и на окончательном – выдающем поток на оборудование пользователя, выполняются в соответствии с описанным алгоритмом. Основные различия между указанными ролями устройств обуславливаются величинами задержки, которую получает пакет, когда помещается в буфер, анализируется, собирается и находится в очереди, необходимой для размещения в поле данных [10].

Как указано ранее, маршрутизаторы работают в условиях, когда производительность определяется нагрузкой сети. Для рассмотрения процессов предлагается смоделировать работу в ненагруженном режиме, при наличии фонового трафика в сети и/или возникновении перегрузки в связи с переполнением буфера.

## 4. Создание модели функционирования устройств

### 4.1. Мультиплексор OTN

Для формирования модели функционирования мультиплексора в описанных условиях выделим подпроцессы обработки одного пакета Ethernet, который содержит сообщение RTP. На основании описанных в предыдущей главе режимов работы мультиплексоров, требуется описать три различные модели: окончательный мультиплексор на входе участка OTN, промежуточный OTN-мультиплексор, окончательный мультиплексор на выходе участка OTN. Это обуславливается различием выполняемых функций.

Для мультиплексора на входе будем считать длительностью обработки время от появления пакета Ethernet (с содержащимся в нем RTP) на интерфейсе пользователя 1GE до выхода транспортного блока OTU1. Следовательно, общую длительность обработки можно определить по формуле (1), где  $T_{вх\ 1GE}$  – задержка преобразования физического сигнала на интерфейсе 1GE, мкс;  $T_{GFP-T}$  – задержка размещения пакета Ethernet в GFP-T в составе суперблоков, мкс;  $T_{OPU}$  – задержка размещения GFP-T в OPU, мкс;  $T_{ODU}$  – задержка формирования данных ODU OH, мкс;  $T_{комм}$  – задержка коммутации сформированного ODU, мкс;  $T_{OTU}$  – задержка формирования данных OTU OH, мкс;  $T_{лин\ пр}$  – задержка преобразования в физический сигнал на выходе OTU, мкс.

Промежуточный мультиплексор вносит задержку, которая может определяться по формуле (2), где  $T_{лин\ пр}$  – задержка преобразования физического сигнала OTU на входе мультиплексора, мкс;  $T_{обр\ OTU}$  – длительность обработки заголовка OTU OH, мкс;  $T_{комм}$  – задержка коммутации транзитного ODU, мкс;  $T_{зап\ OTU}$  – длительность перезаписи OTU OH, мкс.

Оконечный мультиплексор выполняет выделение нагрузки, что соответствует задержке, которая определяется по формуле (3), где  $T_{обр ODU}$  – длительность обработки заголовка ODU ОН, мкс;  $T_{обр OPU}$  – длительность выделения нагрузки из OPU, мкс;  $T_{выд GFP-T}$  – задержка выделения пакета Ethernet из GFP-T;  $T_{вых GE}$  – задержка преобразования на физическом интерфейсе 1GE, мкс.

Величина задержки, которая обуславливается каждым из описываемых процессов, на практике может варьироваться в определенных границах. При моделировании часть процессов будем считать постоянными (характеризуются физическими процессами преобразования сигналов), а остальные (зависят от программной реализации различных алгоритмов) определим с помощью приближенных законов распределения.

$$T_{OTN 1} = T_{вх GE} + T_{GFP-T} + T_{OPU} + T_{ODU} + T_{комм} + T_{OTU} + T_{лин пер} \cdot \quad (1)$$

$$T_{OTN пром} = T_{лин пр} + T_{обр OTU} + T_{комм} + T_{зап OTU} + T_{лин пер} \cdot \quad (2)$$

$$T_{OTN n} = T_{лин пр} + T_{обр OTU} + T_{комм} + T_{обр ODU} + T_{обр OPU} + T_{выд GFP-T} + T_{вых GE} \cdot \quad (3)$$

#### 4.2. Маршрутизатор RTP-сети

При включении участка IP-сети в маршрут обмена сообщениями RTP-маршрутизатор может работать в режимах оконечного узла агрегации (связанного с ядром сети), промежуточного элемента, оконечного  $m$ -го оборудования агрегации (связанного с уровнем доступа). Следовательно, необходимо описать три модели его функционирования.

Общее время обработки на оконечном маршрутизаторе на входе пакетной сети может быть определено по формуле (4), где  $T_{вх GE}$  – задержка на входном интерфейсе 1GE, мкс;  $T_{буф1}$  – задержка входного буфера порта 1GE, мкс;  $T_{IP GE}$  – задержка выделения заголовка IP, мкс;  $T_{комм IP}$  – задержка коммутации, включая различные алгоритмы маршрутизации, мкс;  $T_{сб10}$  – задержка сборки IP-пакета на выходе 10GE, мкс;  $T_{Eth10}$  – задержка сборки пакета Ethernet

в структуре 10GE, мкс;  $T_{вых 10GE}$  – задержка преобразования на выходном интерфейсе 10GE, мкс.

Промежуточный маршрутизатор обеспечивает маршрутизацию потоков 10GE, перенаправляя пакеты с одного порта 10GE на другой. Следовательно, задержка обработки может быть определена по формуле (5), где  $T_{вх 10GE}$  – задержка преобразования на входном интерфейсе 10GE, мкс;  $T_{буф10}$  – задержка входного буфера 10GE, мкс;  $T_{IP 10GE}$  – задержка выделения заголовка IP в составе 10GE, мкс.

Оконечный маршрутизатор обеспечивает выделение пакета Ethernet, переносящего метку времени, с линейного порта 10GE на выходной порт 1GE. Задержка обработки, связанная с данным процессом, может быть определена по формуле (6), где  $T_{сб1}$  – задержка сборки IP-пакета на выходе 1GE, мкс;  $T_{Eth1}$  – задержка сборки пакета Ethernet в структуре 1GE, мкс.

$$T_{марш 1} = T_{вх GE} + T_{буф1} + T_{IP GE} + T_{комм IP} + T_{сб10} + T_{Eth 10} + T_{вых 10GE} \cdot \quad (4)$$

$$T_{марш пром} = T_{вх 10GE} + T_{буф10} + T_{IP 10GE} + T_{комм IP} + T_{сб10} + T_{Eth 10} + T_{вых 10GE} \cdot \quad (5)$$

$$T_{марш m} = T_{вх 10GE} + T_{буф10} + T_{IP 10GE} + T_{комм IP} + T_{сб1} + T_{Eth1} + T_{вых GE} \cdot \quad (6)$$

#### 5. Описание моделей

Модели функционирования устройств в соответствии с приводимым описанием выполняются в среде имитационного моделирования AnyLogic, которая позволяет изучить влияние множества взаимосвязанных подпроцессов на общий результат реализации заданного процесса. Для этого необходимо задать соответствие элементов дискретно-событийной модели и физических процессов, описанных выше. Реализация функций обработки нагрузки рассматривается с точки зрения пакета

Ethernet, который содержит IP-пакет с дейтаграммой UDP, переносящей сообщение RTP. Следовательно, в качестве агента в среде AnyLogic будем полагать пакет Ethernet.

Так как указанные подпроцессы характеризуются временными параметрами, их отображение в модели обеспечивается блоками задержки «Delay», которые задерживают агента на определенное время (константное значение или переменная величина в соответствии с выбранным законом распределения). Генерирование агентов обеспечивает

блок «Source», создающий заданное их количество. После прохождения по блокам задержки агент поступает на приемник «Sink», который его поглощает.

Так как RTP характеризуется двунаправленностью, разработанные модели отображают прохождение пакетов в прямом (от ведущего) и обратном (к ведущему) направлениях. Упрощенный участок OTN состоит из граничного мультиплексора, располагаемого на входе острова и выполняющего последовательное размещение пакетов в структуре информационных блоков, промежуточного, коммутирующего входные блоки данных на заданный интерфейс (в соответствии с информацией из заголовка) и оконечного мультиплексора на стороне клиентского оборудования, выделяющего пакет с меткой времени.

На данном этапе моделирования учитываются процессы, относящиеся к обработке пакетов в границах OTN; работа ведущих и ведомых часов не рассматривается. Это обусловлено тем, что данная модель разработана с целью анализа характера асимметрии задержек, которые вызваны различием времени прохождения пакетов по маршруту. Каждый мультиплексор соединен с соседним по волоконно-

оптической линии связи, вносящей дополнительную задержку. На рисунке 2а изображена полученная модель функционирования RTP для мультиплексоров OTN без специализированных механизмов обработки меток времени.

Для построения модели функционирования RTP в составе пакетной сети построена упрощенная сеть, которая включает маршрутизатор на стороне ведущих часов, промежуточный маршрутизатор и оконечный на стороне потребителя синхронизации. На рисунке 2б приводится сформированная модель для маршрутизаторов IP-сети, работающей на базе 10-гигабитной реализации Ethernet. Аналогично предыдущей модели, процессы, происходящие с пакетами за границами подсети, в данной статье не учитываются, составляя предмет дальнейшего изучения и моделирования. При этом учитывается вносимая оптическим волокном задержка.

Каждая модель обеспечивает 500 реализаций процесса запроса-ответа между ведомым и ведущим устройствами. По результатам его выполнения построены гистограммы распределения времени обработки пакета для каждого из типов устройств в зависимости от режима его работы.

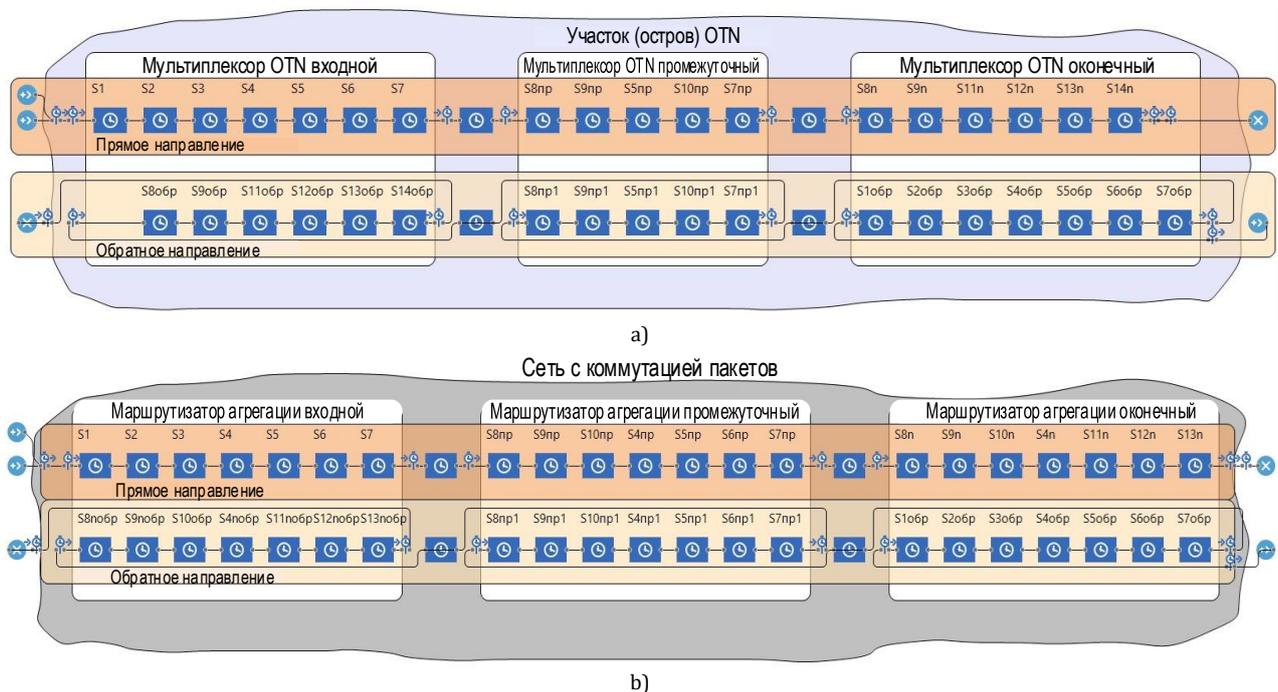


Рис. 2. Модель функционирования: а) мультиплексоров OTN; б) маршрутизаторов

Fig. 2. Model of: a) OTN Multiplexers Functioning; b) Routers Functioning

### 6. Описание исходных данных

Для построения модели требуется задать временные параметры, соответствующие описанным подпроцессам. Величины задержки выбраны на основании данных ведущих производителей теле-

коммуникационного оборудования и микроэлементной базы, публикаций и существующих исследований, связанных с использованием RTP на сетях различной архитектуры. Вероятностно-временные характеристики указанных ранее подпроцессов

приводятся в таблице 1, где единица измерения переменных – мкс, кроме процесса Задержки прохождения сигнала в оптическом волокне G.652 (стандарт оптического одномодового волокна) – в мкс/км.

Данные по вероятностно-временным параметрам процессов в маршрутизаторах приводятся в таблице 2, где единица измерения переменных – мкс, кроме процесса Задержки прохождения сигнала в оптическом волокне 1GE – в мкс/км.

**ТАБЛИЦА 1. Вероятностно-временные характеристики процессов для мультиплексора OTN**

TABLE 1. The Probabilistic Temporal Characteristics for OTN Multiplexer

Процесс	Переменная	Обозначение на схеме	Значение
Преобразование сигнала на входном интерфейсе 1GE	$T_{вх GE}$	S1	0,145
Размещение пакета Ethernet в GFP-T	$T_{GFP-T}$	S2	20–25
Размещение GFP-T в OPU	$T_{OPU}$	S3	5
Генерирование (мультиплексирование) ODU	$T_{ODU}$	S4	5
Коммутация ODU	$T_{комм}$	S5	2–5
Генерирование OTU	$T_{оту}$	S6	0,5–1 RS (1007, 1023) 6–7 RS (255, 239)
Преобразование OTU в оптический сигнал на линейном выходе	$T_{лин пер}$	S7	0,003
Преобразование оптического сигнала в OTU на входном интерфейсе	$T_{лин пр}$	S8	0,003
Обработка заголовка OTU с выделением ODU	$T_{обр OTU}$	S9	0,5–1; 6–7
Перезапись данных заголовка OTU	$T_{зап OTU}$	S10	5
Обработка заголовка ODU, демultipлексирование	$T_{обр ODU}$	S11	5
Обработка заголовка OPU, выделение GFP-T	$T_{обр OPU}$	S12	5
Выделение пакета Ethernet из GFP-T	$T_{выд GFP-T}$	S13	20–25
Преобразование сигнала на выходном интерфейсе 1GE	$T_{вых GE}$	S14	0,145
Задержка прохождения сигнала в оптическом волокне G.652	$T_{ов}$	Слин	5

Архитектура мультиплексора OTN предполагает наличие модулей (пользовательских, линейных), перенаправление потоков ODU между которыми обеспечивается через модуль кросс-коммутации, а схема обработки основана на кадровой структуре и принципах временного мультиплексирования бло-

ков данных. Процессы приема, обработки, передачи блоков данных выполняются последовательно по битам, которые объединяются в кадры и мультикадры [1]. Следовательно, большинство процессов, связанных с прохождением данных внутри мультиплексора OTN, в отношении моделирования, можно считать постоянными по времени. Так как технология OTN предполагает установление постоянных маршрутов, поток данных, поступающий на каждый из портов, имеет постоянную интенсивность. Модуль кросс-коммутации обеспечивает коммутацию между модулями пользователей и линейными модулями или между линейными модулями в зависимости от данных, считанных из заголовка ODU. При этом учитываем, что в зависимости от загруженности портов мультиплексора и режима его работы нагрузка на модуль кросс-коммутации может незначительно изменяться, что отражено в таблице 2. Приведенные данные основаны на результатах, которые можно найти в работе [12], и данных производителя Huawei [13].

**ТАБЛИЦА 2. Вероятностно-временные характеристики процессов для маршрутизатора**

TABLE 2. The Probabilistic Temporal Characteristics for the Router

Описание процесса	Переменная	Обозначение на схеме	Значение
Преобразование сигнала на входном интерфейсе 1GE	$T_{вх GE}$	S1	0,145
Нахождение в буфере входного порта 1GE	$T_{буф1}$	S2	4–10
Выделение заголовка IP из Ethernet в составе 1GE	$T_{IP1}$	S3	4
Коммутация пакета	$T_{комм IP}$	S4	5–10
Сборка пакета в буфере выходного порта 10GE	$T_{сб10}$	S5	4
Формирование структуры 10GE	$T_{Eth10}$	S6	1,2
Преобразование в оптический сигнал на выходном интерфейсе 10GE	$T_{вых 10GE}$	S7	0,11
Преобразование оптического сигнала на входном интерфейсе 10GE	$T_{вх 10GE}$	S8	0,11
Нахождение в буфере входного порта 10GE	$T_{буф10}$	S9	4–10 (до 25%) 10–25 (25–75%) 25–100 (> 75%)
Выделение заголовка IP из Ethernet в составе 10GE	$T_{IP10}$	S10	2
Сборка в буфере выходного порта 1GE	$T_{сб1}$	S11	2
Формирование структуры 1GE	$T_{Eth1}$	S12	12
Преобразование сигнала на выходном интерфейсе 1GE	$T_{вых GE}$	S13	0,145
Задержка прохождения сигнала в оптическом волокне G.652	$T_{ов}$	Слин	5

Следует уточнить, что подсчет FEC выполняется совместно с процессом записи (перезаписи) заголовка OTU, а его проверка соответствует процессу чтения данного заголовка. Для сравнения рассматриваются алгоритмы кодирования с использованием циклических кодов Рида – Соломона вида RS (255, 239) и RS (1003, 1027). Величины задержек, связанных с реализацией данных алгоритмов, можно найти в [10, 11].

Переменные задержки могут возникать на границе пользовательского оборудования и OTN. Так как здесь обеспечивается преобразование входных данных в цифровую структуру OTN, то при этом необходимо учитывать механизмы выравнивания скорости входного потока со скоростью используемых блоков OPU. Данная модель предполагает предварительное размещение потока 1GE в GFP-T, обеспечивающее выравнивание потока пакетов в соответствии с предоставляемым каналом.

Маршрутизатор характеризуется переменными задержками, которые требуются для приема, обработки, коммутации и сборки пакетов. Задержки, связанные с данным оборудованием, можно подразделить на несколько типов. Задержка буферизации обуславливается нахождением пакета в очереди, которая соответствует каждому входному интерфейсу. Задержка обработки связана с алгоритмами, необходимыми для перенаправления полученного пакета на соответствующий интерфейс.

Сериализация пакетов обеспечивает перевод логической структуры пакета в физическую последовательность символов соответствующей коди-

ровки. На основании опыта эксплуатации и данных, которые можно найти в [14–16], можно сказать, что при отсутствии значительной перегрузки (загруженности до 25 %) в сети пакеты в буферах входных портов обслуживаются за время от 4 до 10 мкс. При повышении нагрузки в сети до 25-75 % в связи с фоновым трафиком задержка можеткратно возрастет и составлять от 10 до 25 мкс. Если нагрузка продолжает повышаться более 75 %, часть пакетов начинает отбрасываться из-за переполнения буфера, вызывая скачок задержки до 1000 мкс. Для моделирования ограничим данный предел значением 100 мкс, что позволит обозначить характер изменения задержки. Предлагаемые условия относятся к уровню 10GE, работу буферов портов 1GE условно считаем независимой от изменений нагрузки в сети.

### 7. Результаты моделирования

По результатам моделирования получены гистограммы распределения времени обработки пакетов на мультиплексорах OTN и маршрутизаторах. На рисунке 3 приведен сравнительный анализ для различных кодов, а на рисунке 4 показана зависимость производительности маршрутизаторов от загруженности сети. На рисунке 5 показана асимметрия на участке OTN, на рисунке 6 – для пакетной сети. Величины  $T_{ms}$  и  $T_{sm}$  характеризуют математическое ожидание времени прохождения пакета, соответственно, от ведущего к ведомому устройству & vv. Также величины  $T_{вхСКО}$ ,  $T_{промСКО}$ ,  $T_{выхСКО}$  показывают среднеквадратическое отклонение, полученное в прямом (пр) и обратном (обр) направлениях.

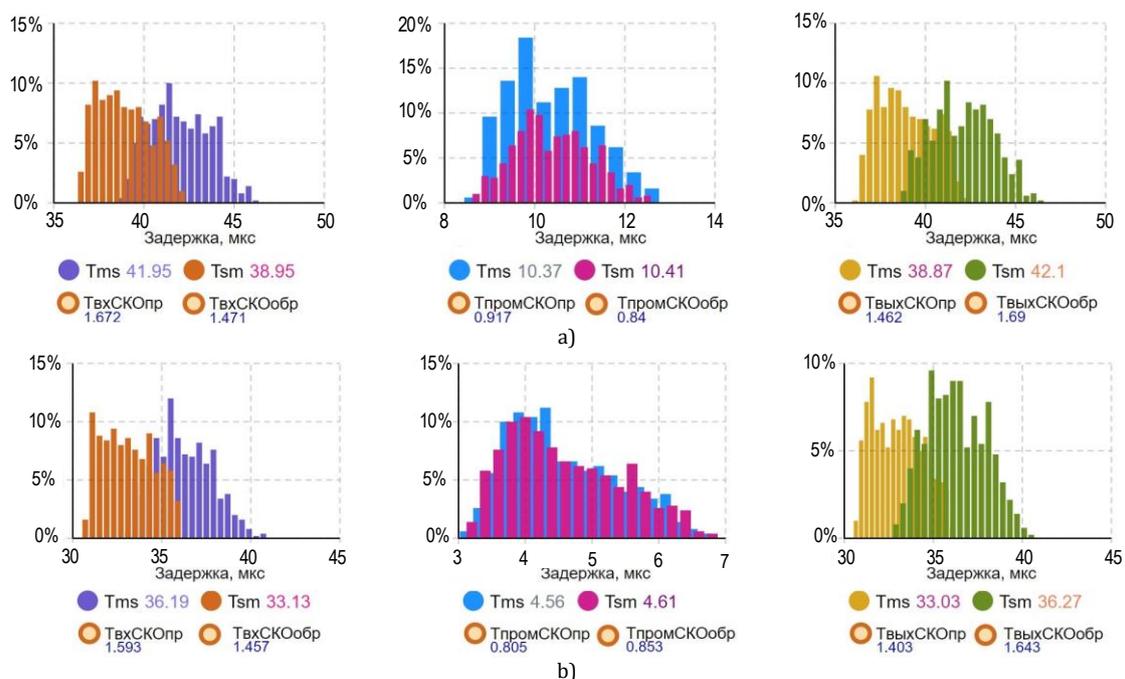


Рис. 3. Распределение задержки на мультиплексорах OTN при использовании: а) FEC RS (255, 239); б) FEC RS (1023, 1007)

Fig. 3. Delay Distribution on OTN Multiplexers when Using: a) RS (255, 239), Deviation  $\sigma = 3,47 \mu s$ ; b) of FEC RS (1023, 1007)

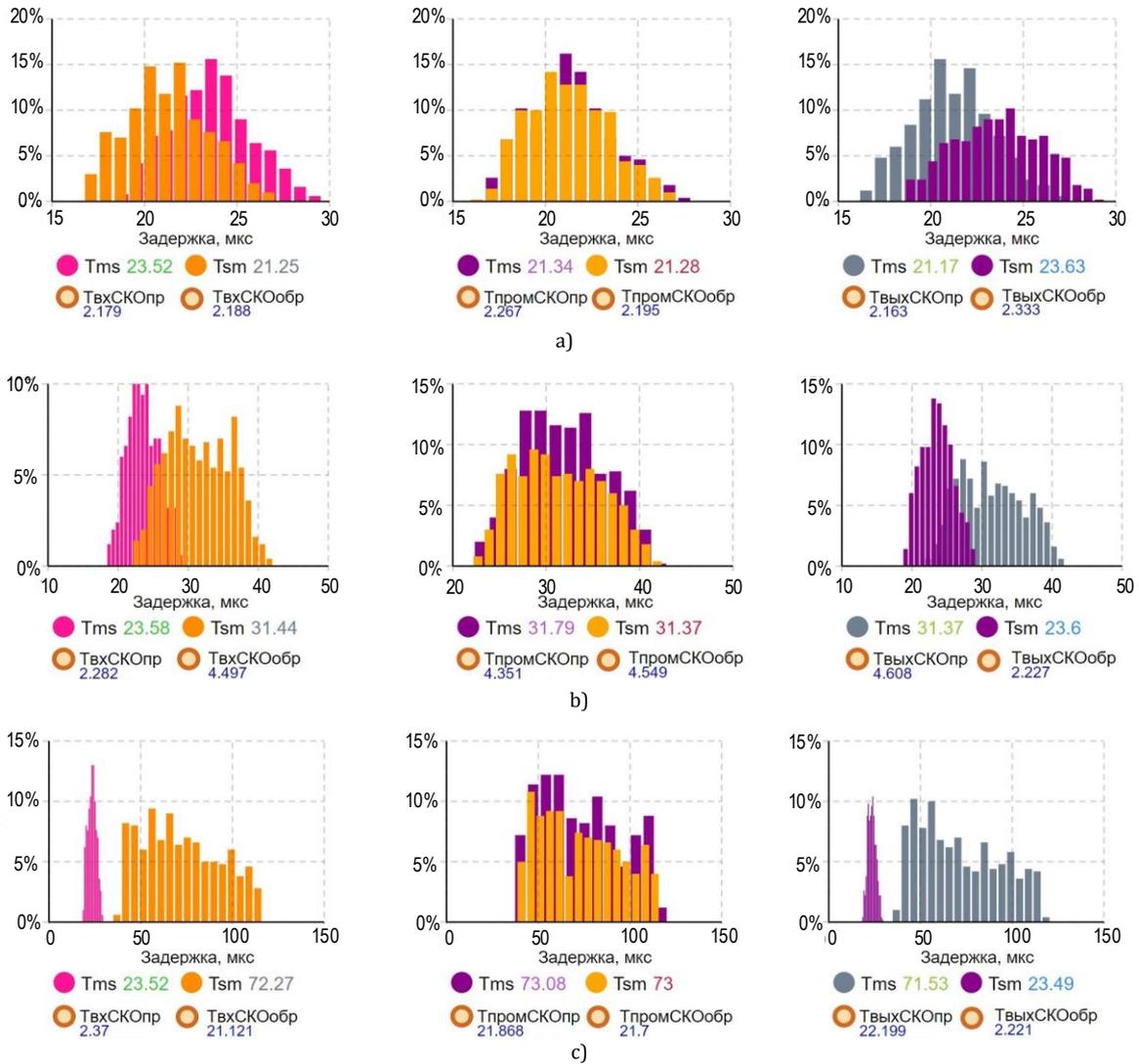


Рис. 4. Распределение задержек на маршрутизаторах при повышении нагрузки: до 25 % (а), до 75 % (б) и более 75 % (в)

Fig. 4. Distribution of Latency on Routers when Load Increases: a) under 25 % of the network load; b) up to 75 %; c) more than 75 %

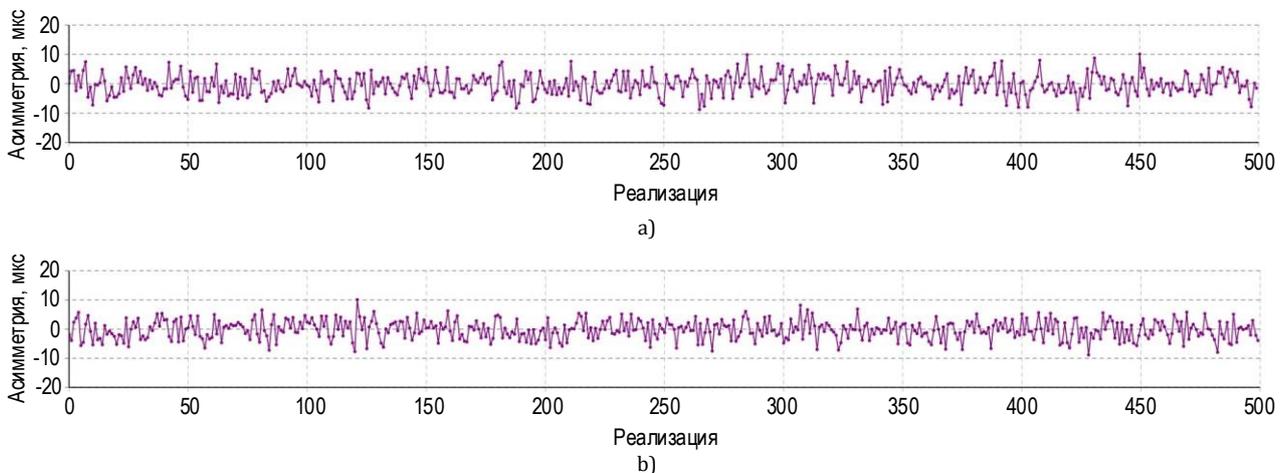


Рис. 5. Асимметрия задержки на участке OTN при различных реализациях: а) RS (255, 239), среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 3,47$  мкс; б) RS (1007, 1023), среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 3,23$  мкс

Fig. 5. Delay Asymmetry on OTN Section at Different Implementations: a) RS (255, 239), Deviation  $\sigma = 3,47 \mu s$ ; б) RS (1007, 1023), Deviation  $\sigma = 3,23 \mu s$

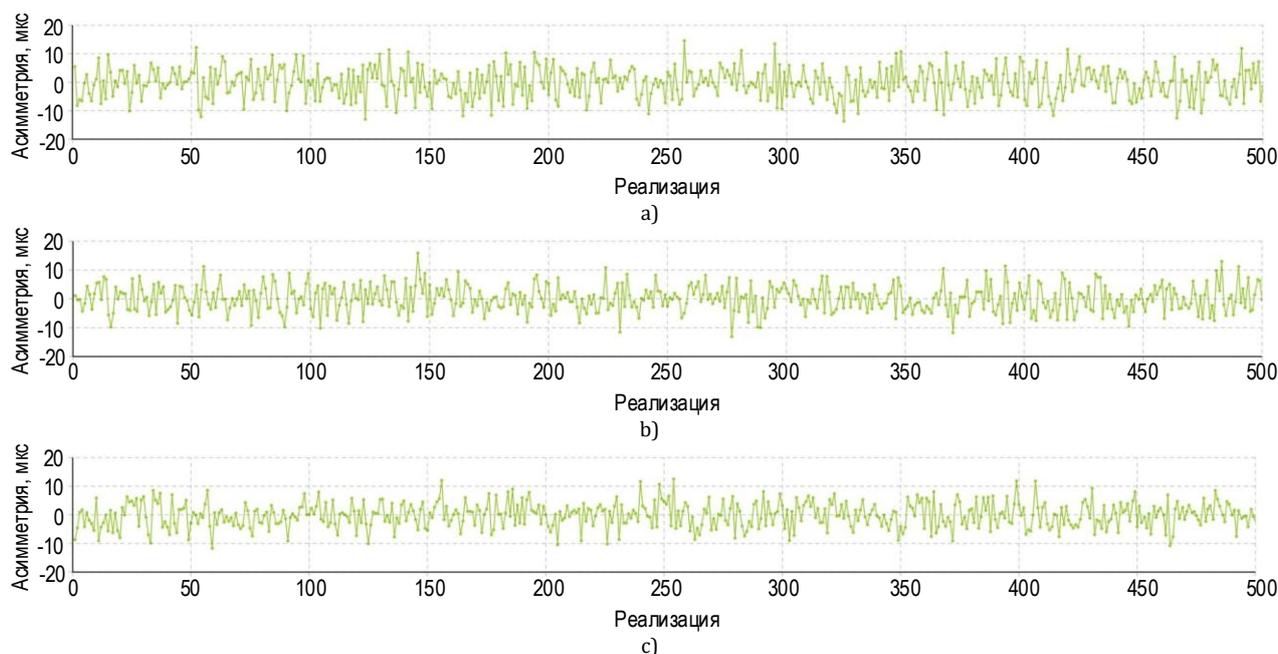


Рис. 6. Асимметрия задержки на участке пакетной сети при загрузке: а) до 25 %,  $\sigma = 5,31$  мкс; б) до 75 %,  $\sigma = 9,26$  мкс; в) более 75 %,  $\sigma = 43,85$  мкс

Fig. 6. Delay Asymmetry on the Packet Network Section During Loading: a) of 25 %,  $\sigma = 5,31$   $\mu$ s; b) of 75 %,  $\sigma = 9,26$   $\mu$ s; c) of 75 %,  $\sigma = 43,85$   $\mu$ s

Величины  $T_{ms}$  и  $T_{sm}$  характеризуют математическое ожидание времени прохождения пакета, соответственно, от ведущего к ведомому устройству & vv. Также величины  $T_{вхСКО}$ ,  $T_{промСКО}$ ,  $T_{выхСКО}$  показывают среднеквадратическое отклонение, полученное в прямом (пр) и обратном (обр) направлениях.

По результатам моделирования можно сказать, что влияние переменных задержек отдельных подпроцессов обработки пакетов Ethernet более заметно для оборудования с коммутацией пакетов. Распределение задержек на мультиплексорах OTN (с учетом принятых допусков) показывает, что наибольший вклад вносят мультиплексоры на входе «острова OTN» (ввод данных пользователя в OTN) и выходе из него (выделение данных на уровень пользователя). Данные результаты характерны для каждого из исследуемых типов FEC.

Для опции FEC с применением RS (255, 239) математическое ожидание задержки составляет 38–42 мкс со среднеквадратическим отклонением 1,4–1,7 мкс. Для промежуточного мультиплексора задержка обработки значительно меньше и по результатам моделирования математическое ожидание составляет 10,3–10,4 мкс со среднеквадратическим отклонением 0,8–0,9 мкс. Это объясняется возможностью цифровой OTN-коммутации, которая обеспечивает перенаправление блоков ODU между линейными модулями без необходимости выделения пакетов Ethernet. Изменение величины задержки, с учетом принятых допущений, носит характер нормального распределения, при этом отсутствуют выбросы, сильно отклоняющиеся от математического ожидания.

Использование FEC с RS (1023, 1007) позволяет снизить задержки, связанные с упреждающим кодированием. На основании результатов моделирования можно сказать, что данный алгоритм позволяет получить математическое ожидание 33–36 с отклонением 1,4–1,7 мкс для оконечного оборудования. На промежуточных устройствах достигается математическое ожидание достигает 4,6 мкс со среднеквадратическим отклонением около 0,8 мкс.

Влияние задержки OTN-коммутации (в данной модели от 2 до 5 мкс) не оказывает значительного влияния на разброс значений. Основной вклад в возникновение переменных задержек вносит подпроцесс преобразования пакетной структуры данных на входном интерфейсе для согласования скорости 1GE с OPU. Соответственно, аналогичные влияния можно указать на выходе данных из мультиплексора OTN в виде потоковой структуры 1GE.

По данным графиков (см. рисунки 6а и 6б) можно сказать, что асимметрия при рассмотренных реализациях практически не изменяется. По результатам моделирования применение RS (1007, 1023) позволяет незначительно снизить среднеквадратическое отклонение.

Использование маршрутизаторов в качестве транспортной системы возможно при учете нагрузки в сети. На рисунке 4а показано, что при работе сети в ненагруженном режиме маршрутизаторы обеспечивают невысокую задержку с математическим ожиданием 23 мкс для входного и 22 мкс для промежуточного и оконечного маршрутизаторов со среднеквадратическим отклонением 2,2–2,3 мкс. Величина и характер изменения математиче-

ского ожидания и среднеквадратического отклонения для входного маршрутизатора при дальнейшем моделировании сохраняются одинаковыми. При повышении нагрузки в сети (см. рисунок 4b) наблюдается увеличение математического ожидания задержки на промежуточных и оконечных устройствах до 31–32 мкс со среднеквадратическим отклонением около 4,5 мкс. Если нагрузка в сети продолжает увеличиваться (см. рисунок 4с), математическое ожидание задержки маршрутизатора может достигать 72 мкс со среднеквадратическим отклонением до 19–21 мкс, что говорит о возможности появления значительной асимметрии задержки при его включении в сеть RTP.

По оценке асимметрии можно сказать, что с ростом нагрузки на сети асимметрия увеличивается также скачкообразно. Если при работе в нормальном режиме она составляет единицы мкс, то при последующем увеличении она достигает десятков мкс, что неприемлемо для использования RTP как механизма привязки шкалы времени.

Таким образом, получен научный аппарат для моделирования прохождения пакетов по сетям различной структуры. Предлагаемые модели функционирования устройств транспортной сети предназначены для описания и исследования общих процессов обработки данных в виде пакетов Ethernet, которые передают метки RTP как вложенную нагрузку UDP-IP. Полученные вероятностно-временные характеристики процессов есть пример использования предлагаемого аппарата в конкретно заданных условиях. Данные модели в дальнейшем должны быть использованы для построения более сложной сетевой модели, предполагающей смешанную архитектуру на основе технологии OTN и классической сети с коммутацией пакетов операторского класса. Вероятностно-временные характеристики, использованные в моделях в качестве исходных данных, подлежат дальнейшему уточнению и, при необходимости, могут корректироваться в соответствии с полученными экспериментальными данными. Это объясняется постоянным совершенствованием архитектуры оборудования и алгоритмов снижения задержек.

#### Список источников

1. Рекомендация МСЭ-Т G.709/Y.1331 (11/2022) Интерфейсы оптической транспортной сети (OTN).
2. Рекомендация МСЭ-Т G.8264/Y.1364 (03/2018) Распределение хронизирующей информации по пакетным сетям.
3. Ferrant J., Gilson M., Jobert S., Mayer M. Synchronous Ethernet and IEEE 1588 in Telecoms. Next Generation Synchronization Networks. John Wiley & Sons, 2013. 356 p. DOI:10.1002/9781118580080
4. Rec. ITU-T G.8260 (11/2022) Definitions and terminology for synchronization in packet networks.
5. Rec. ITU-T G.8251 (09/2010) The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN).
6. Rec. ITU-T G.8265.1/Y.1365.1 (11/2022) Precision time protocol telecom profile for frequency synchronization.
7. Rec. ITU-T G.8275.1/Y.1369.1 (02/2022) Precision time protocol telecom profile for time/phase synchronization with full timing support from the network.
8. Rec. ITU-T G.8275.1/Y.1369.2 (02/2020) Precision time protocol telecom profile for time/phase synchronization with partial timing support from the network.
9. Хмелев К. Основы фотонного транспорта. Киев: Техника, 2008. 680 с.
10. Канаев А.К., Лукичев М.М., Лукичева В.Л. Методика формирования эквивалентного мультисервисного узла технологической сети связи в среде имитационного моделирования, учитывающая все параметры качества обслуживания в установившемся режиме // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 12. С. 13–23. DOI:10.24411/2072-8735-2018-10328. EDN:GFCKKT
11. Wigley L. An Update on Router Buffering: White Paper. // @xrdocs. 2022. URL: [https://xrdocs.io/8000/Buffering-WP\\_March\\_2022.pdf](https://xrdocs.io/8000/Buffering-WP_March_2022.pdf) (Accessed 15.03.2024)
12. Салифов И.И. Методика оценки сквозной задержки на оптической магистральной сети со сложной архитектурой. Дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: Ростелеком, 2012. 253 с. EDN:QFTOZF
13. WDM/OTN Network Latency Composition // Huawei. 2020. URL: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/wdm-otn-network-latency-composition/thread/667240035646324736-667213856692383744> (Accessed 15.03.2024).
14. Veisllari R., Bjornstad S., Stol N. Scheduling techniques in an integrated hybrid node with electronic buffers // Proceedings of the 16th International Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM, Colchester, UK, 17–20 April 2012). IEEE, 2012. PP. 1–6. DOI:10.1109/ONDM.2012.6210185
15. Veisllary R., Bjornstad S., Hjelme D.R. Experimental demonstration of high throughput, ultra-low delay variation packet/circuit fusion network // Electronics Letters. 2013. Vol. 49. Iss. 2. PP. 141–143. DOI:10.1049/el.2012.4156
16. Understanding Network Latency in Ethernet Switches // Fiber Optic Network Products. URL: <https://www.fiber opticshare.com/network-latency-in-ethernet-switches.html#:~:text=Normally%2C%20for%20the%20most%20commonly,from%205%20to%2050%20microseconds> (Accessed 19.03.2024)

#### References

1. Rec. ITU-T G.709/Y.1331. *Interfaces of the optical transport network*. November 2022.
2. Rec. ITU-T G.8264/Y.1364. *Distribution of timing information through packet networks*. March 2018.
3. Ferrant J., Gilson M., Jobert S., Mayer M. *Synchronous Ethernet and IEEE 1588 in Telecoms. Next Generation Synchronization Networks*. John Wiley & Sons Publ.; 2013. 356 p. DOI:10.1002/9781118580080

4. Rec. ITU-T G.8260. *Definitions and terminology for synchronization in packet networks*. November 2022.
5. Rec. ITU-T G.8251. *The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN)*. September 2010.
6. Rec. ITU-T G.8265.1/Y.1365.1. *Precision time protocol telecom profile for frequency synchronization*. November 2022.
7. Rec. ITU-T G.8275.1/Y.1369.1. *Precision time protocol telecom profile for time/phase synchronization with full timing support from the network*. February 2022.
8. Rec. ITU-T G.8275.1/Y.1369.2. *Precision time protocol telecom profile for time/phase synchronization with partial timing support from the network*. February 2022.
9. Khmelev K. *Basics of fotonic transport*. Kiev; Tekhnika Publ.; 2008. 680 p. (in Russ.)
10. Kanaev A., Lukichev M., Lukicheva V. The formation methodology for equivalent multi-service node of a technological communication network in a simulation environment that takes into account all the parameters of the quality of service in a steady mode. *T-Comm*. 2019;13(12):13–23. (in Russ.) DOI:10.24411/2072-8735-2018-10328. EDN:GFCKKT
11. Wigley L. An Update on Router Buffering: White Paper. *xrdocs.io*. 2022. URL: [https://xrdocs.io/8000/Buffering-WP\\_March\\_2022.pdf](https://xrdocs.io/8000/Buffering-WP_March_2022.pdf) [Accessed 15 march 2024]
12. Salifov I.I. *Methods of assessing the delay through the optical backbone network with a complex architecture*. Ph.D. Thesis. Ekaterinburg: Rostelecom Publ.; 2012. 253 p. (in Russ.)
13. *Huawei*. WDM/OTN Network Latency Composition. 2020. URL: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/wdm-otn-network-latency-composition/thread/667240035646324736-667213856692383744> [Accessed 19 march 2024]
14. Veisllari R., Bjornstad S., Stol N. Scheduling techniques in an integrated hybrid node with electronic buffers. *Proceedings of the 16th International Conference on Optical Network Design and Modelling, ONDM, 17–20 April 2012, Colchester, UK*. IEEE, 2012. PP. 1–6. DOI:10.1109/ONDM.2012.6210185
15. Veisllari R., Bjornstad S., Hjelme D.R. Experimental demonstration of high throughput, ultra-low delay variation packet/circuit fusion network. *Electronics Letters*. 2013;49(2):141–143. DOI:10.1049/el.2012.4156
16. *Fiber Optic Network Products*. Understanding Network Latency in Ethernet Switches. URL: <https://www.fiberopticshare.com/network-latency-in-ethernet-switches.html#:~:text=Normally%2C%20for%20the%20most%20commonly,from%205%20to%2050%20microseconds> [Accessed 19 march 2024]

Статья поступила в редакцию 24.11.2023; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 16.02.2024.

The article was submitted 24.11.2023; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 16.02.2024.

## Информация об авторах:

**КАНАЕВ**  
**Андрей Константинович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
 <https://orcid.org/0000-0002-1578-2629>

**КАЗАКЕВИЧ**  
**Елена Владимировна**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
 <https://orcid.org/0000-0002-4549-787X>

**САХАРОВА**  
**Мария Александровна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
 <https://orcid.org/0000-0001-5067-8539>

**ПРОШИН**  
**Федор Алексеевич**

аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
 <https://orcid.org/0009-0009-5513-9302>