

Оценка работы механизмов TSN при передаче трафика различных категорий через узел сети связи

А. И. Алексеев

*Петербургский государственный университет путей
связи Императора Александра I*

alekseevartem.ig@gmail.com

А. К. Канаев

*Петербургский государственный университет путей
связи Императора Александра I*

kanaev@pgups.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматривается функционал технологии сетей, чувствительных ко времени (TSN), обеспечивающий управление задержками кадров Ethernet в соответствии с их приоритетом. Вопрос влияния тех или иных механизмов TSN на результирующую задержку трафика различных категорий представляет интерес в контексте оценки общей эффективности технологии TSN, сочетаемости механизмов друг с другом, а также определения структуры и объёмов трафика, которые рассматриваемая технология позволяет результативно обрабатывать. В настоящей статье демонстрируются результаты имитационного моделирования работы одиночного узла сети – коммутатора TSN, агрегирующего трафик с нескольких входных портов. На основе получаемого при этом выходного потока кадров Ethernet определены и сопоставлены характеристики временных задержек трафика различных приоритетов при использовании существующих механизмов TSN в разных комбинациях.

Ключевые слова: *сети, чувствительные ко времени; сети TSN; сети Ethernet; имитационное моделирование; AnyLogic*

I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение гарантированной своевременной доставки для информации, критичной к задержкам, является одной из четырёх ключевых функций технологии сетей, чувствительных ко времени (TSN – Time-Sensitive Networking), наряду с управлением сетевыми ресурсами, обеспечением надёжности передачи и синхронизацией времени [1][2]. Данная технология, дополняющая стандарт Ethernet, предлагает ряд механизмов управления трафиком, которые призваны комплексно обеспечить надлежащее качество обслуживания для различных категорий пользователей сети. Особое место среди них занимают устройства, генерирующие критичные ко времени потоки TSN: в частности, к ним относятся приложения реального времени в разнообразных управляющих системах, промышленных сетях, опорных сетях 5G [3][4][5]. Для данной группы трафика алгоритмы TSN обеспечивают детерминированные низкие задержки. Однако для прочего трафика стандартом IEEE 802.1Q также вводится дифференцированная система обслуживания, основанная на приоритизации кадров Ethernet и механизмах формирования выходного потока [2][4].

Моделирование работы устройств TSN позволяет оценить эффективность данной технологии в части обеспечения управления задержками при различных

условиях. Наиболее показательной характеристикой в этом случае была бы сквозная задержка, накапливаемая трафиком при прохождении участка сети. Тем не менее, рассмотрение более простого случая прохождения кадров через одиночный узел – коммутатор сети – также позволяет оценить влияние тех или иных механизмов TSN на задержки кадров в формируемом выходном трафике. Поэтому в настоящей работе представлены результаты моделирования работы коммутатора TSN при передаче входящего трафика в различных условиях.

II. ОСОБЕННОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛИ

Существует значительное число работ, посвящённых моделированию устройств TSN [6–8]. Ввиду сложности алгоритма обработки трафика все они используют имитационный подход к построению модели. При этом большинство из них фокусируется на отражении какого-либо одного механизма управления трафиком. В данной работе для эксперимента используется модель коммутатора, подробно представленная в другом докладе этого сборника «Имитационная модель коммутатора Ethernet TSN...». Выгодным её отличием является реализация совместной работы основных механизмов TSN: прямого приоритета, формирователей TAS и CBS, прерывания кадров. Это позволяет гибко настраивать модель и сравнивать результаты симуляции при различных сценариях управления трафиком.

Структурная схема моделируемого коммутатора представлена на рис. 1. Он имеет 4 входных порта и 1 выходной и, таким образом, работает как агрегирующий узел для входного трафика. На рисунке представлены основные элементы, работа которых отражена в модели. Как сказано выше, их функционал можно активизировать в разных комбинациях, что далее будет использовано в эксперименте. Следует отметить, что подробно механизмы TSN описаны, например, в [2], а структура модели в собственно программной среде AnyLogic более полно представлена в вышеназванном докладе сборника.

Можно назвать следующие основные допущения и ограничения модели:

- Модельное время – микросекунды;
- Синхронизация устройств (коммутатора и источников) не моделируется, но предполагается. Все элементы используют общее модельное время, поэтому считается, что синхронизация по протоколу PTP достигнута с высокой точностью;

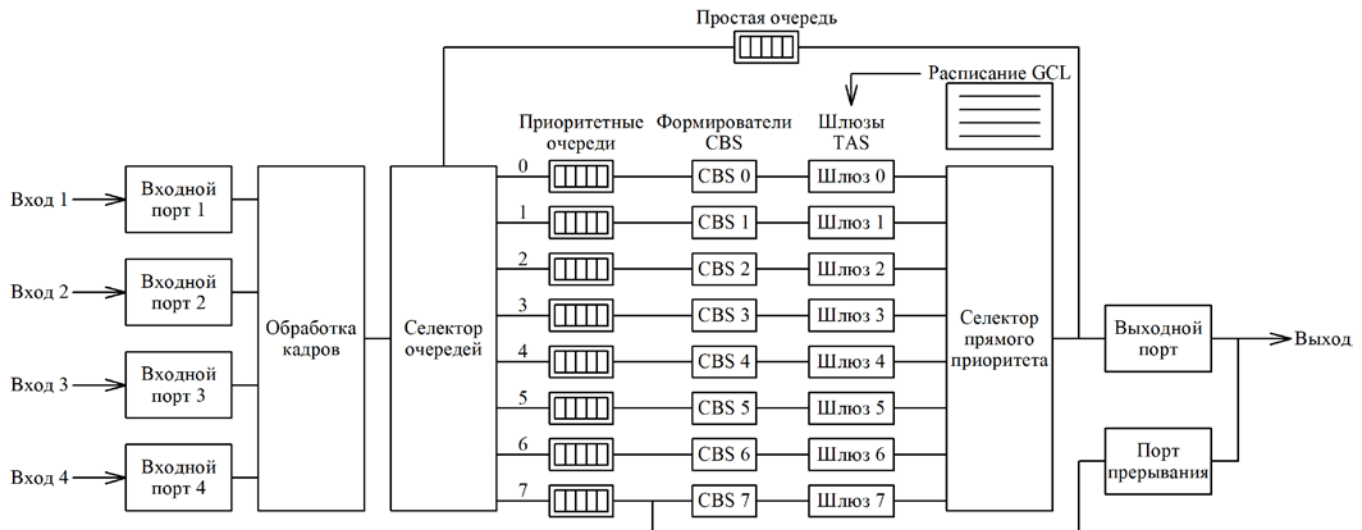


Рис. 1. Структурная схема моделируемого коммутатора TSN

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ВХОДНОГО ТРАФИКА

Источник	Поступление кадров		Размер кадра S , байт		Код приоритета		Тип трафика
	Тип задания	Интенсивность или период	Тип задания	Значение (диапазон)	Тип задания	Значение (диапазон)	
1	Случайный	$\lambda = 120 \text{ мс}^{-1}$	Случайный	800 – 1530	Случайный	0 – 2	Фоновый
2	Случайный	$\lambda = 100 \text{ мс}^{-1}$	Случайный	100 – 800	Случайный	3 – 5	Потоковый (аудио, видео)
3	Случайный	$\lambda = 30 \text{ мс}^{-1}$	Случайный	200 – 500	Постоянный	6	Высокоприоритетный
4	Постоянный	$T = 100 \text{ мкс}$	Постоянный	400	Постоянный	7	Критичный к задержкам (ТТ)

- Число создаваемых в опыте кадров не превышает 50000, что связано с ограничением программы AnyLogic. Это позволяет рассматривать работу коммутатора только на относительно небольшом интервале времени. Тем не менее, это количество достаточно для весьма долгой (в единицах модельного времени) симуляции обработки трафика, получаемая при этом выборка задержек кадров также имеет значительный объём;
- В силу малого количества кадров в модели также не учитывается переполнение очередей.

III. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

A. Параметры входного трафика

Как отмечено в предыдущем докладе, источники в модели коммутатора настроены так, чтобы имитировать неоднородный характер входящего трафика. Для этого интервалы между кадрами задаются случайно через интенсивность экспоненциального распределения. Также с помощью дискретного равномерного распределения варьируются размеры кадров и коды приоритета. Исключение составляет источник 4, соответствующий критичному к задержкам трафику (ТТ-трафику), для которого установлены постоянные размер кадров, код приоритета и период передачи. Значения параметров и тип трафика для каждого источника приведены в таблице I. Среднюю нагрузку L , Мбит/с, создаваемую каждым из источников, можно оценить по выражению:

$$L = \frac{8 \times \bar{S} \lambda}{1000}, \quad (1)$$

где \bar{S} – средний размер кадра, байт; λ – интенсивность источника, мс^{-1} .

Для источника 4 в качестве интенсивности λ следует использовать величину, обратную периоду T , а также исключить деление на коэффициент 1000. Исходя из выражения (1), средняя поступающая на входы 1-4 модели нагрузка составит соответственно 1118,4; 360; 84 и 32 Мбит/с.

B. Пропускная способность портов

Для всех входных портов в рамках опыта задана пропускная способность 1000 Мбит/с. Следует отметить, что, хотя нагрузка источника 1 несколько выше, сгенерированные им кадры будут сохраняться в источнике, пока входной порт не сможет их обработать, и к сбою работы модели это не приведёт. Учитывая, что общая средняя нагрузка составляет порядка 1600 Мбит/с, для выходного порта предлагается выбрать пропускную способность такой же для обеспечения высокой степени загрузки коммутатора в симуляции.

C. Параметры формирователя CBS

Формирователь на основе «кредита» применяется к очередям 3-5. Соотношение скорости нарастания и убывания «кредита» для всех трёх очередей одинаково и установлено равным 0,5 (т.е. при передаче «кредит» списывается в 2 раза быстрее, чем накапливается при ожидании в очереди).

D. Параметры формирователя TAS

Шлюзы формирователя с учётом времени находятся в одном из состояний, задаваемых двоичными векторами расписания GCL. В эксперименте они циклически сменяют друг друга с периодом 25 мкс, что при заданной пропускной способности выходного порта позволяет передать 3 кадра максимального размера. В расписании GCL заданы 4 состояния: «01000111» (очереди 0-2, 6); «00111000» (очереди 3-5); «01111110» (очереди 1-6);

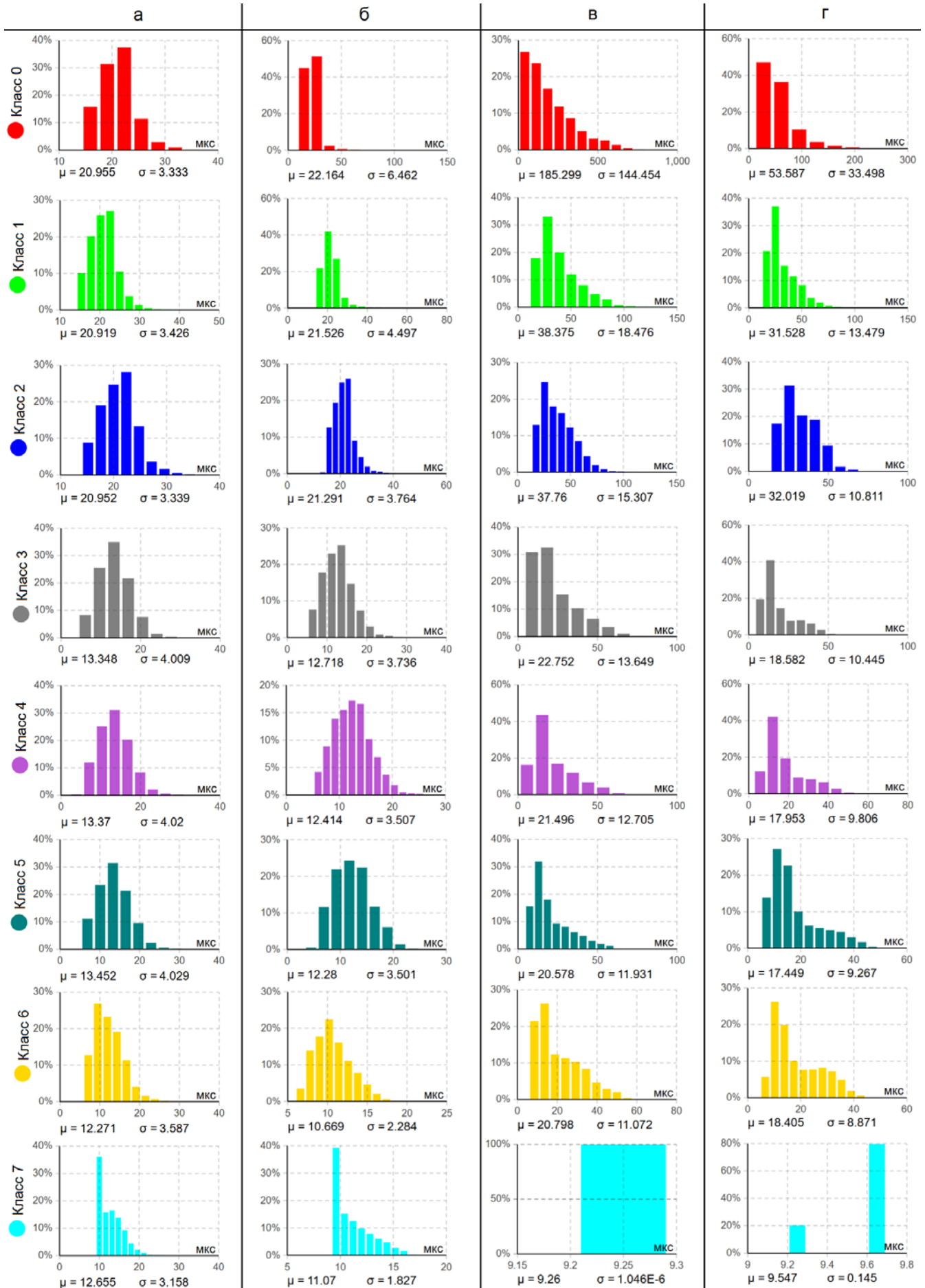


Рис. 2. Гистограммы распределений задержек кадров в режимах: а) без использования механизмов TSN; б) прямой приоритет; в) прямой приоритет, формирователи CBS и TAS; г) прямой приоритет, формирователи CBS и TAS, прерывание кадров

«00111011» (очереди 0-1, 3-5). Кроме того, для передачи ТТ-кадра из очереди 7 заранее планируется состояние «10000000», в котором шлюзы других очередей закрыты.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте рассмотрена передача трафика коммутатором в 4 режимах: 1) общая очередь без TSN; 2) только прямой приоритет; 3) прямой приоритет, CBS и TAS; 4) прямой приоритет, CBS, TAS и прерывание. Результатом эксперимента являются распределения задержек для каждого класса приоритета, полученные как разность меток времени на входе и выходе модели. Гистограммы распределений приведены на рис. 2, также для каждой из них вычислено среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Можно сказать, что в целом большинство гистограмм имеет асимметричное распределение, визуально похожее на распределение Вейбулла, логнормальное или гамма-распределение. Следует подробнее остановиться на каждом режиме.

На рис. 2(а) показаны гистограммы задержек при передаче трафика через общую очередь без приоритетов. В данном случае задержки определяются только случайными параметрами кадров (размером и частотой поступления) и общей случайностью процесса их смешивания в единой очереди. Поэтому из гистограмм и статистических характеристик видно, что распределения классов, поступающих из одного источника (0-2 и 3-5), одинаковы. Это обусловлено равномерной случайной генерацией кадров с разными приоритетами (таким образом, с точностью до значения PCP кадры одного источника идентичны с точки зрения статистических свойств). Касательно средних задержек можно отметить, что они убывают по мере роста приоритета кадров, что, однако, в случае общей очереди связано с уменьшением среднего размера кадра (как видно из таблицы I).

Распределения на рис. 2(б) интересны тем, что в отличие от предыдущего случая, здесь видно явное снижение средней задержки и стандартного отклонения при увеличении приоритета кадров. Исключением являются классы 6-7 (средняя задержка первого немного ниже, чем второго). Это объясняется небольшой долей класса 7 (средняя формируемая нагрузка вдвое ниже, чем у класса 6). В целом полученный в опыте результат закономерен, так как в этом случае учитывался прямой приоритет очередей коммутатора. Следует отметить также, что генерация трафика различных классов, как говорилось выше, задана неравномерно. Кроме того, суммарная нагрузка соответствовала пропускной способности коммутатора. В случае же повышения доли критичного трафика, а также при перегрузке коммутатора роль приоритетов будет существеннее.

В случае рис. 2(в) в модели были задействованы формирователи CBS и TAS. При этом по полученным гистограммам отмечается, прежде всего, значительный рост задержек всех классов трафика, кроме последнего (хотя тенденция к снижению задержки с ростом приоритета сохраняется). Причиной этого следует считать не вполне подходящее составление расписания GCL, которое обеспечивает сам процесс варьирования состояний шлюзов в симуляции, но при этом не учитывает соотношение объемов трафика различных классов. Как результат, шлюзы часто оказываются закрыты для более заполненных низкоприоритетных очередей, при этом коммутатор, переслав все более

приоритетные кадры, ожидает смены состояния, ничего не передавая. Помимо этого, кадры также не передаются в интервалах формирования окна для ТТ-трафика. Что касается последнего, видно, что его задержка снизилась по сравнению с предыдущими случаями и имеет детерминированный характер, что демонстрирует работу формирователя TAS при передаче критичного трафика.

Наконец, гистограммы рис. 2(г) иллюстрируют режим с прерываниями кадров. Здесь следует отметить, что задержки снизились по сравнению с предыдущим случаем (в силу отсутствия длинных окон передачи ТТ-кадров), хотя всё ещё достаточно велики (из-за продолжения работы TAS для классов 0-6). Кроме того, по-прежнему выполняются приоритеты. Задержки для класса 7 принимают два детерминированных значения. Первое соответствует случаям, когда кадр поступает в момент свободности выходного порта, и прерывание не требуется; здесь задержка равна таковой в предыдущем режиме. Второе же соответствует случаям прерываний, поэтому задержка несколько выше из-за вставки служебной посылки.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе представлены результаты имитационного эксперимента, посвящённого передаче трафика через коммутатор TSN. В результате получены распределения временных задержек кадров Ethernet различного приоритета для разных режимов работы коммутатора, проведён их сравнительный анализ, объяснены факторы изменения задержек. Дальнейшая работа будет посвящена более подробному рассмотрению отдельных механизмов TSN при уточнённых входных данных, а также масштабированию модели для исследования участков сети, состоящих из нескольких узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group [Электронный ресурс]. – URL: <https://1.ieee802.org/tsn/> (дата обращения: 03.03.2026)
- [2] Алексеев А.И., Канаев А.К. Сети, чувствительные ко времени, и их использование на железнодорожном транспорте // 78-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2023. С 202–205.
- [3] IEEE Std. 802.1TM-2022. IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks – Bridges and Bridged Networks.
- [4] FU Shousai, ZHANG Hesheng, and CHEN Jinghe. Time Sensitive Networking Technology Overview and Performance Analysis. ZTE Communications, December 2018 Vol. 16 No. 4, pp. 57–64.
- [5] Glenn Parsons, Jessy Rouyer, Janos Farkas. How Time-Sensitive Networking Benefits Fronthaul Transport, 5 August 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://standards.ieee.org/beyond-standards/how-time-sensitive-networking-benefits-fronthaul-transport/> (дата обращения: 03.03.2026).
- [6] Junhui Jiang, Yuting Li, Seung Ho Hong, Mengmeng Yu, Aidong Xu, Min Wei. A Simulation Model for Time-sensitive Networking (TSN) with Experimental Validation. Conference Paper: 24th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, September 2019, pp. 153–160.
- [7] Wen-Kang Jia, Gen-Hen Liu, Yaw-Chung Chen. Performance Evaluation of IEEE 802.1Qbu: Experimental and Simulation Results. Conference Paper: 2013 IEEE 38th Conference on Local Computer Networks (LCN 2013), October 2013.
- [8] Máté, M., Simon, C. & Maliosz, M. Asynchronous Time-Aware Shaper for Time-Sensitive Networking. Journal of Network and Systems Management 30, 76 (2022) [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1007/s10922-022-09688-y> (дата обращения: 03.03.2026).