

Имитационная модель коммутатора Ethernet TSN для исследования механизмов управления трафиком в перспективных сетях связи железнодорожного транспорта

А. И. Алексеев

*Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I*

alekseevartem.ig@gmail.com

А. К. Канаев

*Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I*

kanaev@pgups.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке имитационной модели коммутатора, поддерживающего технологию сетей, чувствительных ко времени (TSN). Данная технология, расширяющая классический Ethernet, призвана обеспечить гарантии своевременной доставки кадров, критичных к задержкам, для чего в сетевых устройствах с поддержкой функционала TSN предусмотрен ряд механизмов приоритизации и управления трафиком. Эти механизмы в совокупности формируют сложный алгоритм обработки кадров, что делает проблематичным аналитическое моделирование процесса передачи и его дальнейшее исследование. По этой причине в настоящей работе предлагается использование имитационного подхода к моделированию коммутатора TSN. В представленной модели реализованы основные механизмы управления трафиком, определяемые стандартами TSN, предусмотрена возможность гибкой настройки модели за счёт выборочного включения того или иного функционала TSN, что позволяет оценить влияние различных формирователей трафика на итоговые задержки кадров при их пересылке через коммутатор. Разработанная модель реализована в среде имитационного моделирования AnyLogic.

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

I. ВВЕДЕНИЕ

Технология сетей, чувствительных ко времени (TSN – Time-Sensitive Networking), представляет собой перспективное направление развития стандарта Ethernet. Она предполагает применение к трафику ряда механизмов управления, приоритизации и контроля, чтобы обеспечить для наиболее критичной информации гарантии детерминированных низких задержек и высокую надёжность доставки. Это, в свою очередь, позволяет использовать пакетные сети на базе Ethernet для транспортировки чувствительных к задержкам и потерям высокоприоритетных данных [1]. В контексте сетей связи железнодорожного транспорта, обеспечивающих ответственный технологический процесс, механизмы TSN также могут быть интересны как средство, которое нивелирует ограничения и недостатки классических сетей Ethernet. Это расширяет возможности применения проводных пакетных сетей для передачи в том числе трафика ответственных видов связи. В перспективе такой подход может позволить в

значительной мере унифицировать сетевую инфраструктуру и более эффективно использовать пропускную способность сети.

Ключевыми элементами сети TSN являются располагающиеся в узлах коммутаторы, внутри которых реализуются алгоритмы управления трафиком. Поэтому моделирование работы коммутатора TSN представляет интерес для дальнейшего изучения влияния различных механизмов TSN на итоговый поток кадров, формируемый на выходе узла сети. В настоящей работе представлена модель коммутатора TSN, построенная с использованием имитационного подхода.

II. МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ В СЕТЯХ TSN

Стандарт 802.1Q описывает технологию TSN и характеризует различные её аспекты: временную синхронизацию, обеспечение низких задержек, надёжность и управление ресурсами [2][3]. В контексте данной работы представляет интерес второй из них, так как именно за счёт локальных механизмов, реализуемых в коммутаторах, осуществляется управление кадрами и очередями, позволяющее добиться низких задержек для приоритетных классов трафика. Структурная схема коммутатора TSN [1][2] представлена на рис. 1.

Управление задержками обеспечивается за счёт приоритизации трафика, а также ряда механизмов, определяющих порядок его передачи и называемых формирователями (shapers). Ранжирование кадров Ethernet реализуется за счёт присвоения им кодов приоритета (PCP – Priority Code Point) от 0 (низший) до 7 (высший), задающих класс трафика. Соответственно, в коммутаторах для этих классов организуется система отдельных очередей, и в первую очередь при прочих равных условиях передаче подлежат кадры более высокого приоритета. Однако, как показано на рис. 1, помимо прямого приоритета очередей в узлах сетей TSN применяется ещё ряд алгоритмов выбора передаваемых кадров. Ключевым из них является формирователь с учётом времени (TAS – Time-Aware Shaper), который обеспечивает создание окон передачи для тех или иных групп трафика. Формирователь управляет шлюзами очередей 0-7, открывая и закрывая их в соответствии с расписанием управления шлюзами (GCL – Gate Control List). Оно выполняется циклически и вычисляется для всех узлов сети с учётом задержек передачи между ними,

III. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КОММУТАТОРА TSN

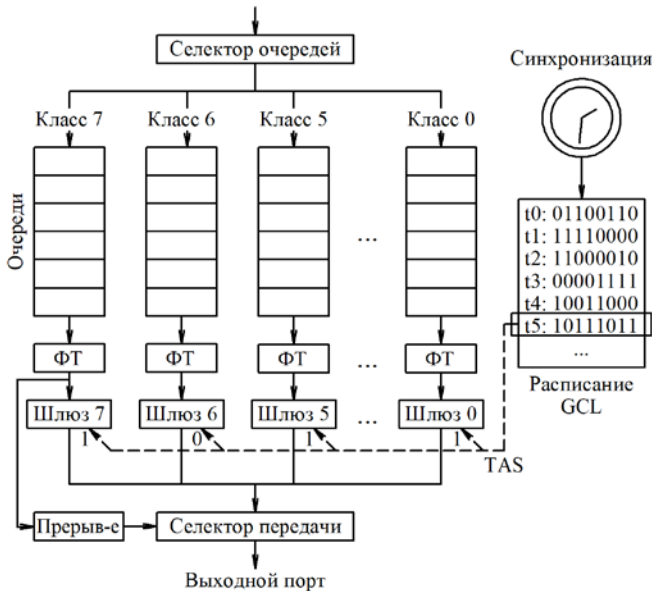


Рис. 1. Структурная схема коммутатора TSN

при этом все устройства строго синхронизованы с использованием протокола PTP. За счёт этого становится возможным открыть шлюз для высокоприоритетного трафика точно в момент его поступления, создавая изолированное окно передачи и, таким образом, минимизируя задержку прохождения через узел сети. Данный механизм является важнейшим элементом технологии TSN, который позволяет гарантировать низкие и детерминированные задержки в пакетных сетях на базе Ethernet [1][2][4].

Помимо формирователя TAS, к тем или иным очередям могут применяться и другие формирователи трафика (ФТ). В частности, для трафика аудио и видео, требующего равномерной передачи, разработан формирователь на основе кредита (CBS – Credit-Based Shaper). Для очереди с CBS вычисляется «кредит» времени, при положительном значении которого передача разрешается. В процессе передачи «кредит» равномерно уменьшается. Если в очереди есть кадры, но передача не ведётся (например, «кредит» стал отрицательным или началась передача более приоритетного трафика), то величина «кредита», наоборот, равномерно увеличивается. Другой возможный вариант – асинхронный формирователь трафика (ATS – Asynchronous Traffic Shaper), похожий на формирователь CBS, но регулирующий передачу на уровне отдельных потоков трафика, а не очередей.

Кроме формирователей, для особо приоритетного трафика технология TSN предусматривает прерывания кадров (Frame Preemption). Этот механизм позволяет приостановить текущую передачу кадра Ethernet при поступлении на коммутатор другого, критичного к задержкам (TT – Time-Triggered) кадра. Передача прерывается специальной служебной посылкой, после чего отправляется более приоритетный кадр. По завершении вновь следует служебная посылка, а затем возобновляется передача прерванного кадра.

В общем случае стандарт TSN допускает одновременное использование различных сочетаний формирователей, а также различное количество выделяемых приоритетов кадров [1][2][4].

Названные механизмы в совокупности формируют сложный многопараметрический алгоритм обработки кадров коммутатором TSN. Представить и в явном виде аналитически описать его работу весьма проблематично. По этой причине для построения модели выбран имитационный подход, позволяющий задать логику, соответствующую описанным механизмам, и затем оценить статистические результаты выполнения модели. Для её реализации используется среда моделирования AnyLogic, обладающая хорошей наглядностью, имеющая широкий набор готовых блоков для имитации задержек, очередей, проверки выполнения условий и др., а также инструментарий для параметризации и программирования сложной логики.

A. Общая структура модели

Модель разработана с опорой на схему рис. 1, для обеспечения гибкости в ней реализованы основные названные механизмы (прямой приоритет, прерывание, формирователи TAS и CBS) и предусмотрены элементы, для включения этих механизмов в разных комбинациях. Вид модели представлен на рис. 2, здесь же приведена таблица с перечнем используемых стандартных блоков AnyLogic. Модельное время – микросекунды.

B. Имитация кадров Ethernet

Кадры Ethernet реализуются в виде агентов – объектов, обладающих набором параметров и обрабатываемых блоками модели. Для кадров создан отдельный вид агентов *Frame*, которому добавлены два параметра: код приоритета *PCP*, принимающий целые значения от 0 до 7; размер *Size*, принимающий также целые значения от 72 до 1530 (соответствует диапазону возможных размеров кадров Ethernet в байтах с учётом всех служебных полей и нагрузки) [1].

C. Источники трафика

Модели источников трафика подробно описаны в другом докладе сборника «Реализация одиночных источников трафика...». При построении же модели коммутатора TSN использован упрощённый подход, обеспечивающий разнообразие и случайность кодов приоритета, размера кадров и общего объёма трафика. Источниками служат блоки *Source1-4*, формирующие кадры с фиксированным периодом *T* или случайно по экспоненциальному закону согласно интенсивности λ . Также в этих блоках кадрам присваиваются значения размера *Size* и кода *PCP*, задаваемые либо постоянными, либо случайными по дискретному равномерному закону. В таблице I представлены численные значения параметров каждого из источников.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКОВ ТРАФИКА

Источник	Тип генерации	Размер <i>Size</i> , байт	Код приоритета <i>PCP</i>
Source1	Эксп. р.; $\lambda = 120 \text{ мс}^{-1}$	Равномерн. р.; 800 – 1530	Равномерн. р.; 0 – 2
Source2	Эксп. р.; $\lambda = 100 \text{ мс}^{-1}$	Равномерн. р.; 100 – 800	Равномерн. р.; 3 – 5
Source3	Эксп. р.; $\lambda = 30 \text{ мс}^{-1}$	Равномерн. р.; 200 – 500	Постоянный; 6
Source4	Периодич.; $T = 100 \text{ мкс}$	Постоянный; 400	Постоянный; 7

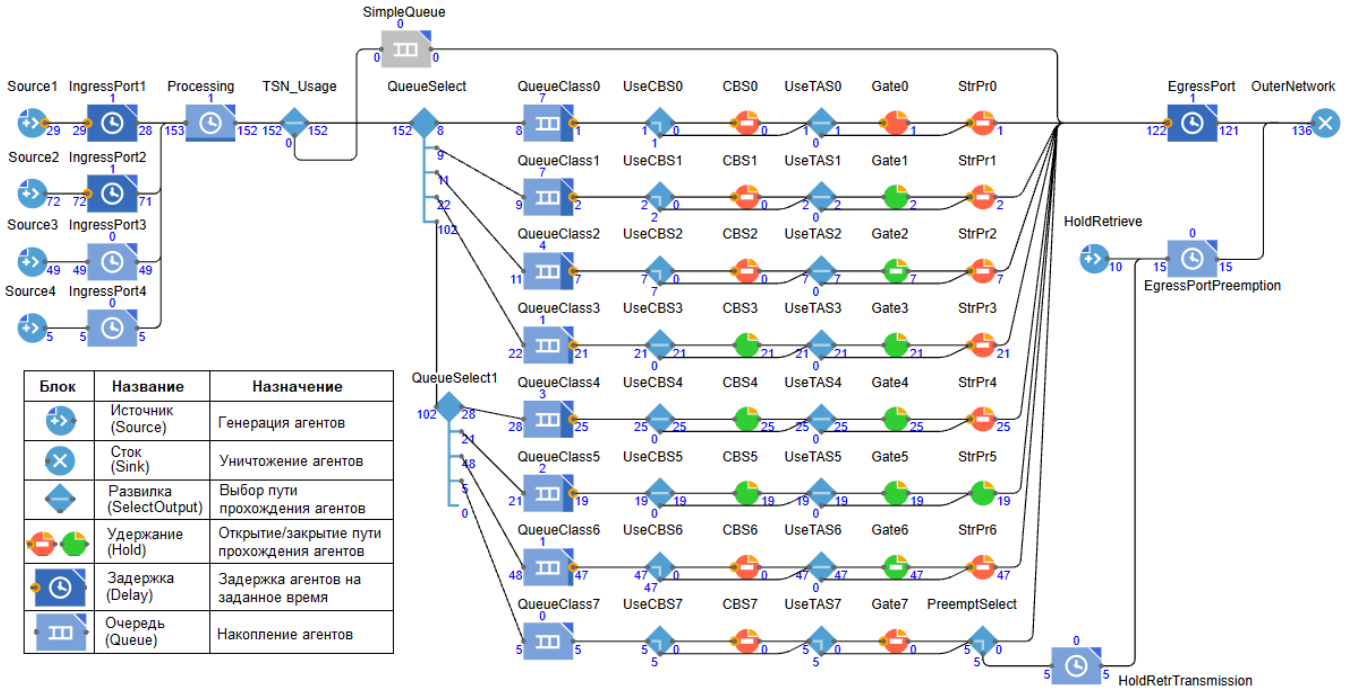


Рис. 2. Схема имитационной модели коммутатора TSN в AnyLogic и назначение используемых блоков

D. Порты коммутатора

В модели 4 входных порта (*IngressPort*) и 1 выходной (*EgressPort*) реализованы как блоки с вместимостью 1 и задержкой t_{Port} , мкс, определяемой по выражению:

$$t_{Port} = \frac{Size \times 8}{B_{Port}}, \quad (1)$$

где $Size$ – вышеназванный размер кадра, байт; B_{Port} – пропускная способность порта, Мбит/с (или бит/мкс).

E. Очереди и прямой приоритет

В модели есть 8 блоков очередей *QueueClass0-7*, распределение по ним кадров выполняется блоками *QueueSelect* и *QueueSelect1* на основании значений *PCP*. Также предусмотрена общая очередь *SimpleQueue*, дающая возможность сравнить работу модели с механизмами TSN и без них. Выбор между ней и приоритетными очередями делается в блоке *TSN_Usage* на основе значения логической переменной *EnableTSN*. Кроме того, перед очередями добавлен блок *Processing*, который отражает время на обработку кадров в коммутаторе, добавляя для них задержку 4 мкс (значение выбрано с учётом наибольшего размера кадров и пропускной способности реального коммутатора [5]). Прямой приоритет (Strict Priority) очередей реализуется с помощью блоков *StrPr0-6*. Управляющая ими функция периодически проверяет состояние очередей и открывает наиболее приоритетную из тех, формирователи которых разрешают передачу в данный момент.

F. Формирователи на основе «кредита» (CBS)

Формирователь CBS ориентирован на потоковый трафик аудио и видео [1][2], однако для расширения возможностей модели в ней предусмотрена возможность применять CBS ко всем очередям в любом сочетании. Использование формирователя в целом и конкретно для той или иной очереди задаётся через специальные логические переменные. В соответствии с логикой работы формирователя, описанной выше, для очередей с

CBS вычисляется изменение «кредита»: повышение со скоростью *IdleSlope* или понижение со скоростью *SendSlope*. Если передача из очереди блокируется шлюзом TAS, подсчёт останавливается, а, если очередь пуста, «кредит» обнуляется. Так как существенно только соотношение скоростей, в рамках модели задана переменная *IdleSlope* и соотношение *IdleSendRatio* для каждой из очередей. Тогда «кредит» при увеличении и уменьшении соответственно равен:

$$\begin{cases} Credit_{new} = Credit_{old} + IdleSlope \times \Delta t; \\ Credit_{new} = Credit_{old} - \frac{IdleSlope}{IdleSendRatio} \times \Delta t. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $Credit_{new}$ и $Credit_{old}$ – новое и старое значение «кредита», Δt – время между пересчётами «кредита».

G. Формирователь с учётом времени (TAS)

Формирователь TAS реализован с помощью шлюзов очередей *Gate0-7* и набора функций, отвечающих за их открытие и закрытие в соответствии с расписанием GCL. Оно задаётся в виде двоичных векторов и в рамках модели включает 4 состояния. Длительность нахождения в них одинакова и задана равной 25 мкс. Также предусмотрено состояние «1000000», в котором открыт только шлюз высшего приоритета. В нём формирователь планирует окно передачи для трафика, генерируемого источником *Source4*, закрывая другие шлюзы, с учётом времени начала работы источника и задержек:

$$t_{TT} = t_{Offset} + \frac{Size_{TT} \times 8}{B_{Port}} + t_{Prc} - \frac{1530 \times 8}{B_{Port}}, \quad (3)$$

где t_{TT} – начало окна передачи, мкс; t_{Offset} – время начала работы источника, мкс; t_{Prc} – задержка обработки, мкс; $Size_{TT}$ – размер приоритетного кадра, байт.

Последнее слагаемое в выражении (3) обеспечивает защитную полосу, чтобы к моменту поступления критичного к задержкам кадра выходной порт был

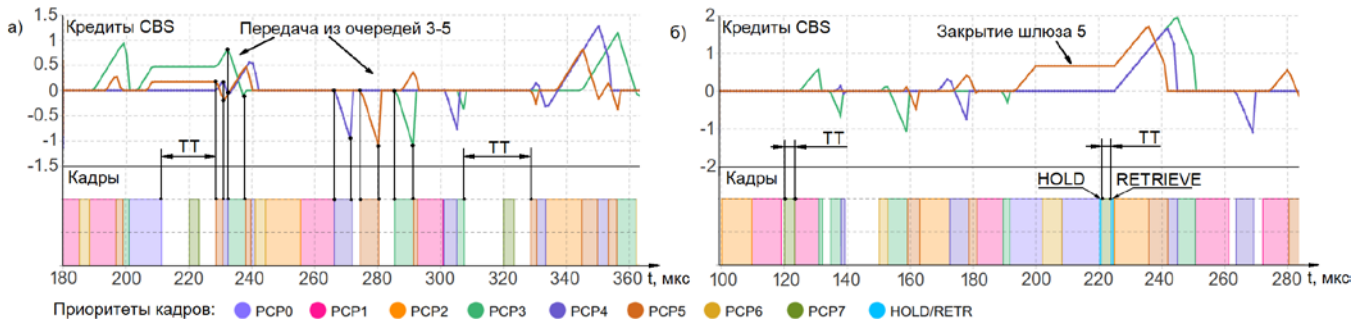


Рис. 3. Временная диаграмма работы модели коммутатора TSN: а) без прерываний кадров; б) с прерываниями кадров

гарантированно свободен. По завершении передачи шлюза возвращаются в предыдущее состояние и продолжают работать согласно GCL. Следующее окно планируется с учётом периода работы источника.

Н. Прерывание кадров

Прерывание кадров является альтернативой окнам передачи TAS и также реализовано для кадров высшего приоритета. Для него в модель включены фиктивный выходной порт *EgressPortPreemption*, блок для хранения приоритетного кадра *HoldRetrTransmission* и источник служебных посылок *HoldRetrieve*. Поступление кадра в очередь 7 инициирует прерывание: передаваемый в данный момент кадр задерживается в основном порте, после чего через фиктивный порт передаются посылка начала прерывания *Hold*, ТТ-кадр и посылка конца прерывания *Retrieve*. Затем возобновляется передача прерванного кадра из *EgressPort*. Допустимо прервать один и тот же низкоприоритетный кадр не более 5 раз.

И. Совместная работа механизмов TSN

В модели предусмотрена работа отдельных или сразу нескольких механизмов TSN. Базовое включение их в модели активизирует только прямой приоритет. Далее он совместим с любой комбинацией формирователей. Исключение составляет очередь высшего приоритета, для которой включение TAS блокирует работу CBS, а включение прерываний – работу CBS и TAS.

IV. ДЕМОНСТРАЦИЯ РАБОТЫ МОДЕЛИ

Чтобы оценить правильность работы модели, следует провести симуляцию с задействованием вышеописанных механизмов. В частности, предлагается рассмотреть два варианта опыта: 1) с активным функционалом прямого приоритета, формирователями CBS для очередей 3-5 и формирователем TAS; 2) со всем тем же функционалом, а также с включением прерываний кадров. Набор циклически сменяющихся состояний в расписании GCL: «01000111», «00111000», «01111110», «00111011» (а также состояние «10000000» при передаче ТТ-кадра).

Результаты работы модели приведены рис. 3, где совмещены временные диаграммы передачи кадров из выходного порта и графики изменения «кредита» очередей 3-5. На рис. 3(а) показан режим с активными TAS и CBS, но без прерываний. Из диаграммы хорошо видна работа формирователей CBS, выражающаяся в убывании «кредитов» соответствующих очередей при передаче из них кадров, а также последующем росте «кредита» в процессе ожидания кадров в очереди. По спадам графиков видно, что моменты передачи кадров приоритетов 3-5 достаточно равномерно разнесены во времени, что также отвечает функции формирователей CBS. Также на представленной диаграмме отмечены два

изолированных окна передачи, сформированных TAS для ТТ-кадров. Как было сказано ранее, перед моментом поступления кадра на передачу создаётся защитный интервал и обеспечивается свободное состояние выходного порта. Кроме того, можно отметить, что на период существования окна прекратилось вычисление «кредитов» для очередей 3 и 5.

На рис. 3(б) изображена аналогичная диаграмма для режима с активным прерыванием кадров. Значимым её отличием от предыдущей является отсутствие названных окон передачи, так как вместо TAS приоритет ТТ-кадров обеспечивает прерывание. При поступлении первого из этих кадров выходной порт не был занят, поэтому он был передан в рамках прямого приоритета, на что указывает отсутствие служебных посылок. Второй ТТ-кадр, напротив, был передан с использованием прерывания, что видно из диаграммы, на которой до и после него следуют короткие посылки служебных кадров. Формирователи CBS работают, как и в предыдущем режиме. Можно отметить период закрытия шлюза TAS для очереди 5 после смены состояния GCL, в результате чего её «кредит» перестал изменяться.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья посвящена разработке имитационной модели коммутатора Ethernet TSN. Подробно рассмотрена и описана гибкая структура модели и общая логика действия её элементов, представлены временные диаграммы, показывающие соответствие работы модели механизмам TSN, которые в ней отражены. В дальнейшем данная модель может использоваться для исследования и сравнительного анализа влияний различных механизмов на задержки передачи кадров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] IEEE Std. 802.1TM-2022. IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks – Bridges and Bridged Networks.
- [2] Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. TSN – сети Ethernet, чувствительные ко времени // «Инфокоммуникационные технологии» Том 19, № 2, 2021 с. 187–201.
- [3] Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group [Электронный ресурс]. – URL: <https://1.ieee802.org/tsn/> (дата обращения: 03.03.2026)
- [4] 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).
- [5] EKI-8510G-2FI Datasheet(PDF) - Advantech Co., Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1523888/ADVANTECH/EKI-8510G-2FI.html> (дата обращения: 03.03.2026).