

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЯМИ ПЕТРИ  
КОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
TIME-TRIGGERED ETHERNET**

*К. И. Никишин, Н. Н. Коннов*

**MODELLING OF COMMUNICATION HARDWARE  
TIME-TRIGGERED ETHERNET USING COLORED PETRI NETS**

*K. I. Nikishin, N. N. Konnov*

*Аннотация. Актуальность и цели.* Современная тенденция развития автоматических систем управления предполагает использование технологии Ethernet для передачи трафика реального времени (изохронного). Гарантированная доставка информации жесткого реального времени с точностью до микросекунды обеспечивается технологией Time-Triggered Ethernet (ТТЕ). Цель данного исследования – моделирование телекоммуникационного оборудования, реализующего технологию ТТЕ, которая состоит из компонентов, приближенных к реальности. *Материалы и методы.* Реализация задач была достигнута за счет использования математического аппарата иерархических временных цветных сетей Петри. Для построения моделей на основе сетей Петри использовался пакет CPN Tools. *Результаты.* В работе подробно описаны модели кадра ТТЕ и основные компоненты ТТЕ (защитник системы, очереди, полоса пропускания канала, входной/выходной порты коммутатора и др). Модель ТТЕ позволяет изучить передачу в сети регулярного и эластичного трафика. *Выводы.* Моделирование ТТЕ позволяет изучить саму технологию, наглядно увидеть передачу трафика реального времени и эластичного в модели, изучить работу защитника системы в случае передачи кадра реального времени. Кроме того, модель будет полезна при разработке новых компонентов, усовершенствований технологии ТТЕ.

*Ключевые слова:* Time-Triggered Ethernet, защитник, кадр реального времени, окно приема кадра, сети Петри.

*Abstract. Background.* The current trend of the development of automatic control systems involves the use of Ethernet technology to transmit the real-time traffic (isochronous). Guaranteed transmission of hard real-time information with precision of microseconds is provided by the technology Time-Triggered Ethernet (TTE). The purpose of this study is modelling of telecommunication hardware, implements technology of TTE, which consists of components that are close to reality. *Materials and methods.* The implementation of the research objective was achieved by the use of mathematical apparatus of hierarchical time colored Petri nets. The package CPN Tools was used for developing models based on Petri nets. *Results.* In detail the article describes the model of frame of TTE and basic TTE components (guardian of the system, queues, channel bandwidth, input/output ports of the switch, etc.). TTE model allows the study of transmission of regular and stochastic traffic in the network. *Conclusions.* Modelling Time-Triggered Ethernet allows to explore the technology, to visualize the transmission of frames of real and stochastic traffic in the model, to study the guardian of the model in the case of transmission real-time frame.

Additionally, the model will be useful in developing new components, improvements of Time-Triggered Ethernet.

**Key words:** Time-Triggered Ethernet, guardian, real-time frame, acceptance window frame; Petri nets.

### ***Введение***

На сегодняшний момент Ethernet является подавляющей сетевой технологией для локальных сетей LAN. Постоянно растут новые требования к работе коммуникационных протоколов, накладывая тем самым новые ограничения и адаптации к Ethernet для критически важных приложений. Сегодня существуют различные вариации Ethernet, такие как Ethernet Powerlink, ProfiNet, Ethernet IP в промышленности, ARINC 664-p7 для аэрокосмических приложений. Но все эти вариации Ethernet объединяет центральное понятие качества обслуживания QoS (Quality of Service).

Time-Triggered Ethernet (ТТЕ) является продолжением и вариацией развития Ethernet и основывается на парадигме коммуникации срабатывания по времени [1]. Таким образом, ТТЕ используется в критически безотказных системах и системах со смешанным типом критичности [2–3].

В статье рассматривается модель ТТЕ, обрабатывающая трафик двух типов: регулярный и эластичный. Выбор данных типов трафика неслучаен. Поскольку для передачи трафика реального времени используется период с соответствующим интервалом и необходимо вычислять задержку кадра через определенные временные интервалы в модели, то тип у данного трафика будет регулярный. Выбор эластичного трафика связан со стандартной передачей кадра в Ethernet, для данного типа трафика не столь важны понятия быстродействия и минимизации задержки кадра. Все основные компоненты модели приближены к реальным, к ним относятся защитник системы, очереди, полоса пропускания канала и др. Свободно распространяемый пакет CPN Tools был выбран в качестве инструмента имитационного моделирования, позволяющего исследовать различные аспекты поведения сложных телекоммуникационных систем и использующего математический аппарат иерархических временных цветных сетей Петри [4–5].

### ***Основные положения Time-Triggered Ethernet***

ТТЕ стандартизован SAE. Стандарт SAE AS6802 [6–7] был разработан в 2010 г. ТТЕ обеспечивает отказоустойчивость в распределенных конечных системах и коммутаторах. На сегодняшний день механизмы функционирования сетей ТТЕ находят широкое применение в современных бортовых системах управления мобильными объектами (авиация, автомобили, спутники). Поэтому ТТЕ стандартизирован объединением инженеров американской автомобильной индустрии SAE, поскольку затрагиваются вопросы разработки новых механизмов и повышения быстродействия в бортовых системах управления. Рассмотрим основные положения этого стандарта. ТТЕ объединяет в себе два вида сообщений: сообщения, которые срабатывают по времени (ТТ-сообщение) или по событию (ЕТ-сообщение). ТТ-сообщение жестко

синхронизировано по времени через глобальное время системы и определяется системой по идентификатору в сообщении. Кроме того, ТТ-сообщение должно обрабатываться с минимальной задержкой. Все эти признаки отличают ТТ-сообщение от ЕТ-сообщения. ЕТ-сообщение относится к эластичному трафику, который обрабатывается Ethernet.

Центральное положение в ТТЕ занимает появление понятия периодических циклов, т.е. для каждого кадра реального времени создается свой виртуальный таймслот. Этот таймслот координируется через TDMA-раунды. TDMA-раунды работают в режиме множественного доступа с временным разделением (TDMA) [8–9]. Тем самым становится возможным вычислить задержку кадра (предсказуемая задержка) и снизить джиттер в системе.

Модель ТТЕ поддерживает два вида трафика: реального времени и эластичный (стандартный). Важное место в ТТЕ занимает синхронизация всех компонентов системы. Обмен кадрами с параметрами синхронизации обеспечивается протоколом кадров управления (Protocol Control Frames PCF). Протокол кадров управления представляет собой многоступенчатый алгоритм, и в конечном итоге посылается сообщение о новой задержке всем клиентам и серверу. Вычисление самой задержки для синхронизации устройств осуществляется через функцию сжатия. Схематично работа протокола кадров управления представлена на рис. 1. В модели этот протокол не рассматривается и считается, что требуемая задержка известна коммутатору.

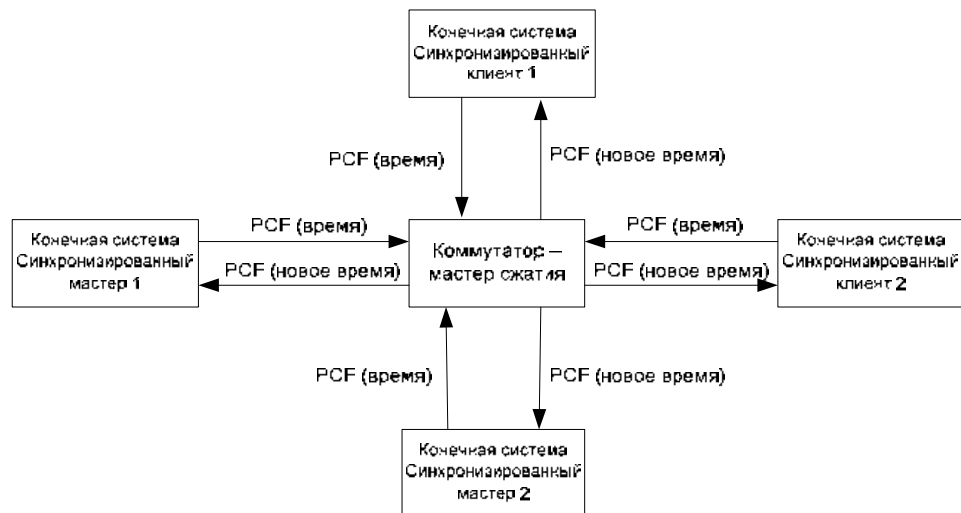


Рис. 1. Работа протокола кадров управления

ТТЕ полностью поддерживает формат кадра Ethernet, стандартизованного в стандарте IEEE 802.3 [10–11]. Формат кадра Ethernet представлен на рис. 2. Формат кадра ТТЕ немного отличается от стандартного формата, так как основывается на ARINC 664 [1]. В стандарте ARINC 664 используется небольшое изменение адреса назначения.

Данное поле разделяется на два параметра: 32-битное константное поле, которое позволяет определить трафик реального времени или эластичного

типа, и 16-битное поле – уникальный идентификатор виртуальной связи Virtual Link Identifier (VL ID). Коммутатор хранит идентификаторы VL ID в виде статической конфигурируемой таблицы. Соответственно, входной порт знает через статическую конфигурируемую таблицу, на какой выходной порт выдавать кадр. TTE основывается на формате ARINC 664.

Преамбула	Начальный ограничитель кадра	Адрес назначения	Адрес источника	Тип/Длина	Данные	Контрольная сумма	Минимальный межкадровый интервал
-----------	------------------------------	------------------	-----------------	-----------	--------	-------------------	----------------------------------

Рис. 2. Формат кадра Ethernet

Все основные положения TTE использовались при разработке модели: определение двух типов сообщений по константному полю – ТТ-сообщение или ЕТ-сообщение; учет в модели задержки для синхронизации устройств, которая определяется через протокол PCF; использован формат кадра, поддерживаемый по технологии TTE.

### Модель Time-Triggered Ethernet на сетях Петри

Модель TTE состоит из следующих компонентов: подсеть чтения кадров из файла и восстановление кадров по времени «Noise Traf»; подсеть выборки кадра «Dispatch frames»; подсеть защитника системы «Guard»; подсеть буфера «Buffer»; подсеть классификатора кадров «Classifier»; подсети очередей «Queue»; подсеть обслуживания очередей «scan»; подсети полос пропускания канала «band»; подсеть выходного порта «OutPort». Верхний уровень иерархии модели TTE представлен на рис. 3 и состоит из частей, описанных выше. Подсети «Classifier», «Queue», «scan», «band» представлены в буфере модели TTE.

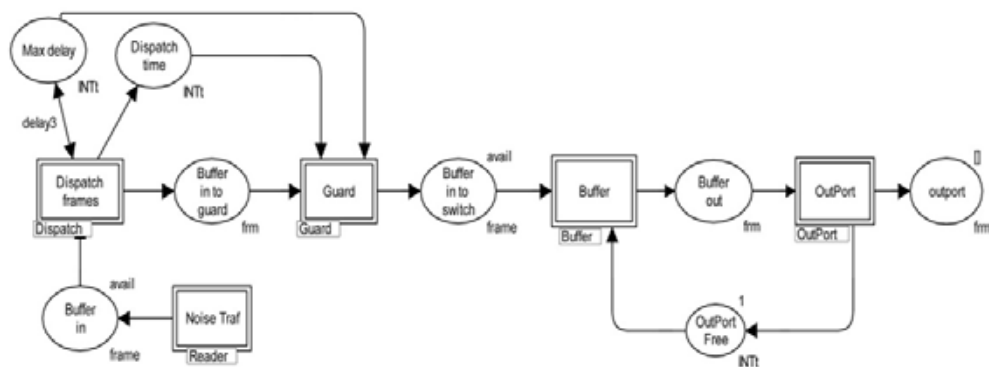


Рис. 3. Верхний уровень модели TTE

Цвет, представляющий кадр TTE, описывается следующим образом:  
 $colset\ frm = product\ INT*MAC*ConstFld*MAC*QoS\ *INT*INTt*INTt\ de-$   
 $clare\ input\_ms;$

В данном формате представлены следующие поля: номер кадра, адрес источника, константное поле, уникальный идентификатор кадра, тип QoS, длина кадра, входное и выходное время кадра. Определение кадра к типу реального времени или эластичному происходит за счет константного поля *ConstFld*. Если константное поле *ConstFld = 7*, то это кадр реального времени (ТТ-кадр), иначе это кадр эластичного типа (ВЕ-кадр). Разнообразие цветов кадра *frm* позволяет обнаруживать и обрабатывать события, связанные с наличием или отсутствием кадра в модели за счет маркера передачи кадра либо за счет свободного состояния *avail*.

Подсеть чтения кадров согласно описанному выше формату ТТЕ представлена на рис. 4. Чтение реализовано на переходе *Set Frame param* в сегменте кода. С помощью функции *val infile = TextIO.openIn («MWritefromTraffGenTTEthernet.txt»)* осуществляется открытие файла, который был получен монитором из модели генератора трафика. Все кадры отправляются строго по времени, на переходе конвертации времени *Convert* стоит задержка  $@+(delay-delta)$ , и далее кадр поступает в следующие подсети. Более подробно описание генератора трафика и описание подсети чтения кадров представлено в статье [12].

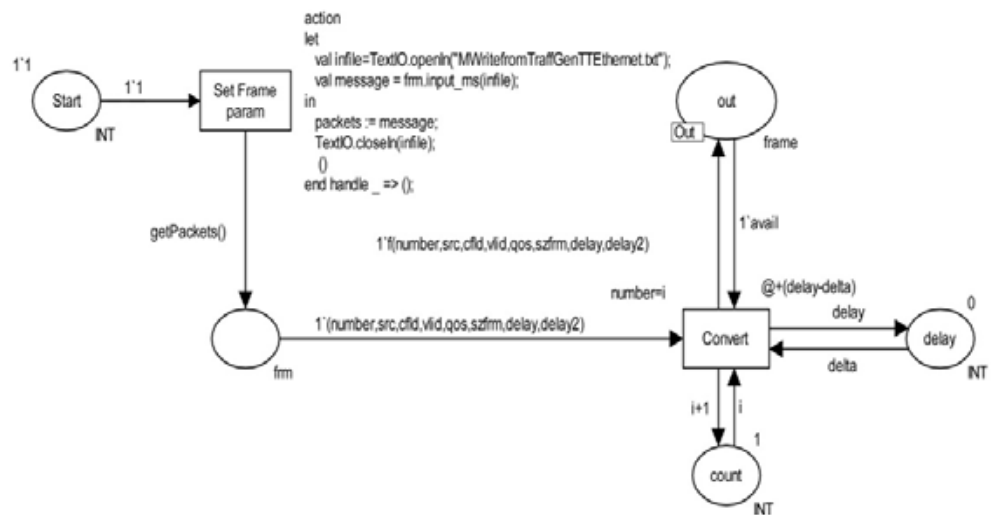


Рис. 4. Подсеть чтения кадров из файла

После этого кадр поступает в подсеть выборки. Данная подсеть показывает, что передача кадра от клиента собственно к коммутатору занимает некоторое время. Данная подсеть анализирует принятый кадр: кадр реального времени или эластичный кадр по полю *ConstFld = 7*. Передача кадра по модели представляется в виде маркера следующего вида:  $f(number,src,cfld,vlid,qos,szfrm,delay,delay2)$ ; данное выражение соответствует описанию цвета *frm*.

В подсети выборки кадра определяется момент выбора ТТ-кадра. Тем самым на это уходит некоторое время, называемое *dispatch\_time*. Здесь вычисляется также максимальная задержка. Поскольку в статье не

рассматривается моделирование протокола кадров управления, имитации синхронизации всех узлов, имитации клиент-серверного взаимодействия и вычисление новой задержки, рассчитанной по старым значениям задержек от всех узлов ТТЕ, то вычисляется абстрактная максимальная задержка через функцию *MaxTime*, предварительно записав в константы две задержки для расчета максимальной. Значение максимальной задержки хранится в позиции *Max delay*. Функция *MaxTime* описывается на языке CPN ML [13]:

*fun MaxTime(time1,time2) = if time1>time2 then time1 else time2;*

В случае если ТТ-кадр не укладывается в определенный интервал, данный кадр удаляется из сети. Подсеть выборки кадра представлена на рис. 5. В подсети «*Dispatch frames*» проверяется значение текущего времени *GetTime* с суммой выходного времени кадра (*delay2*) и максимальной задержки, определяемой через функцию *MaxTime (delay)*, и если текущее время больше полученной суммы, то кадр удаляется из сети (позиция *Delete frames*), иначе проходит дальше. ВЕ-кадр не проходит данную проверку. Все допущенные кадры отправляются к защитнику системы [14–16].

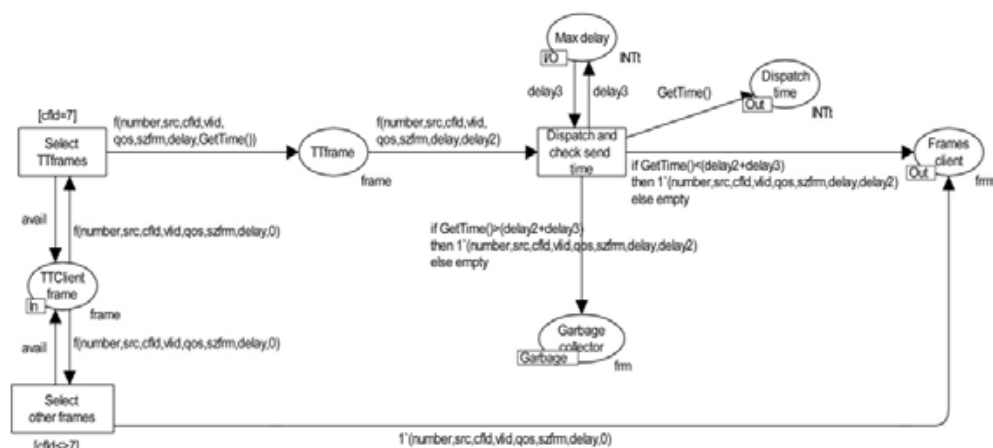


Рис. 5. Подсеть выборки кадра

Особое место в системе ТТЕ занимает защитник системы. Функциональность защитника заложена в коммутатор ТТЕ и защищает сеть от произвольных неисправных конечных систем.

Работа защитника при обработке ТТ-кадров заключается в следующем: передается ТТ-кадр в соответствии с синхронизированным глобальным временем. У каждого клиента имеется своя локальная таблица расписания кадров, по которому в строго определенное время клиент должен передавать кадр. Все таблицы расписаний синхронизированы с глобальным временем. Когда достигнута точка выдачи кадра во времени (*dispatch\_pit*) на клиенте, т.е. по таблице расписания, определяется выборка ТТ-кадра.

Затем должен наступить момент передачи самого кадра от клиента к коммутатору (*send\_pit*). Задержка *send\_pit* ограничена максимальным значе-

нием задержки при передаче –  $\max(\text{send\_delay})$ . Момент приема кадров уже на стороне коммутатора ограничен следующим выражением:

$\text{receive\_pit} = \text{send\_pit} + \text{link\_latency}$ , где  $\text{link\_latency}$  – задержка непосредственно самой передачи.

Коммутатор ТТЕ настроен на выполнение проверки окна приема, когда точка получения ТТ-кадра во времени располагается в пределах окна приема. Начало окна приема вычисляется следующим образом [1,17]:

$\text{момент начала окна приема} = \text{dispatch\_pit} + \text{link\_latency} - \Pi$ , где  $\Pi$  – точность.

Окончание окна приема ТТ-кадра вычисляется следующим образом:

$\text{момент окончания окна приема} = \text{момент начала окна приема} + 2\Pi + \max(\text{send\_delay})$

Если момент времени  $\text{receive\_pit}$  не возникает в отведенном временном окне приема, то ТТ-кадр удаляется из сети и помещается в позицию Delete frames (рис. 6).

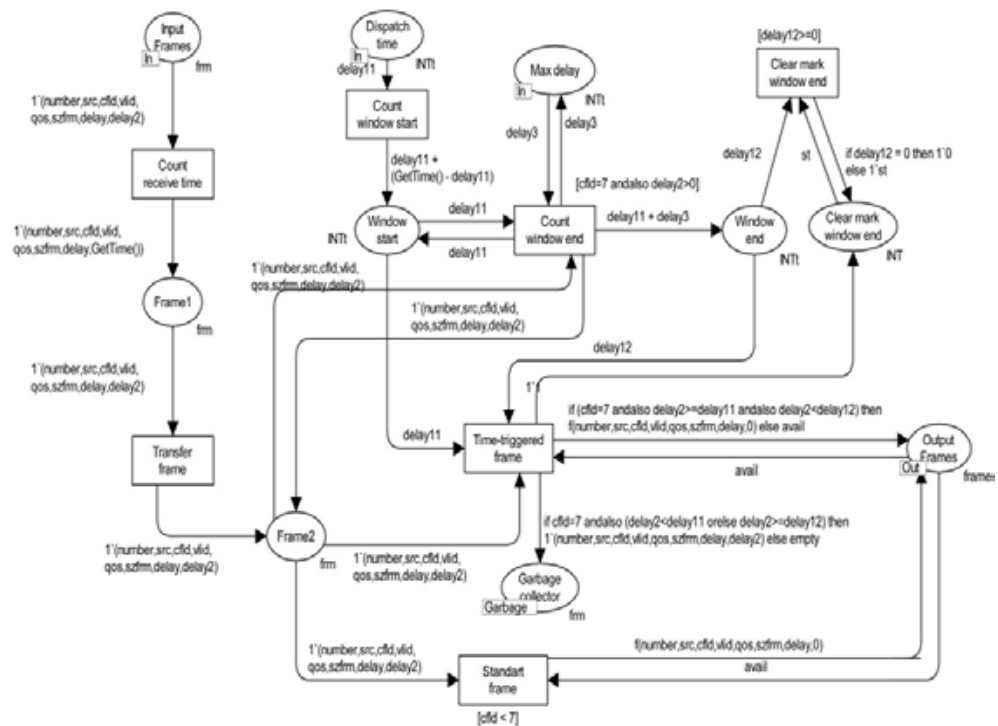


Рис. 6. Подсеть защитника системы

Входными портами подсети защитника являются:

- позиция *Input Frames* (получает кадр любого вида трафика);
- позиция *Dispatch time* (хранит момент времени выдачи кадра от клиента);
- позиция *Max delay* (хранит максимальную задержку передачи).

Кроме того, присутствует позиция *Link latency*, в которой хранится время передачи самого кадра. Выходная позиция *Output Frames* передает кадр (ТТ-кадр или ВЕ-кадр) в коммутатор с учетом выполнения всех времен-

ных рамок для ТТ-кадра. Если не соблюдается условие по временному окну приема, то ТТ-кадр отправляется на удаление из сети и находится в позиции *Delete frames*. Позиция *Window start* хранит время начала окна приема, позиция *Window end* хранит время окончания окна приема. Более подробное функционирование защитника ТТЕ рассмотрено в [17].

Затем кадр поступает непосредственно в коммутатор. Подсеть буфера учитывает классификацию трафика в зависимости от полей *ConstFld* и *QoS*, поддерживает различные алгоритмы диспетчеризации управления очередями коммутатора. Подсеть буфера коммутатора представлена на рис. 7.

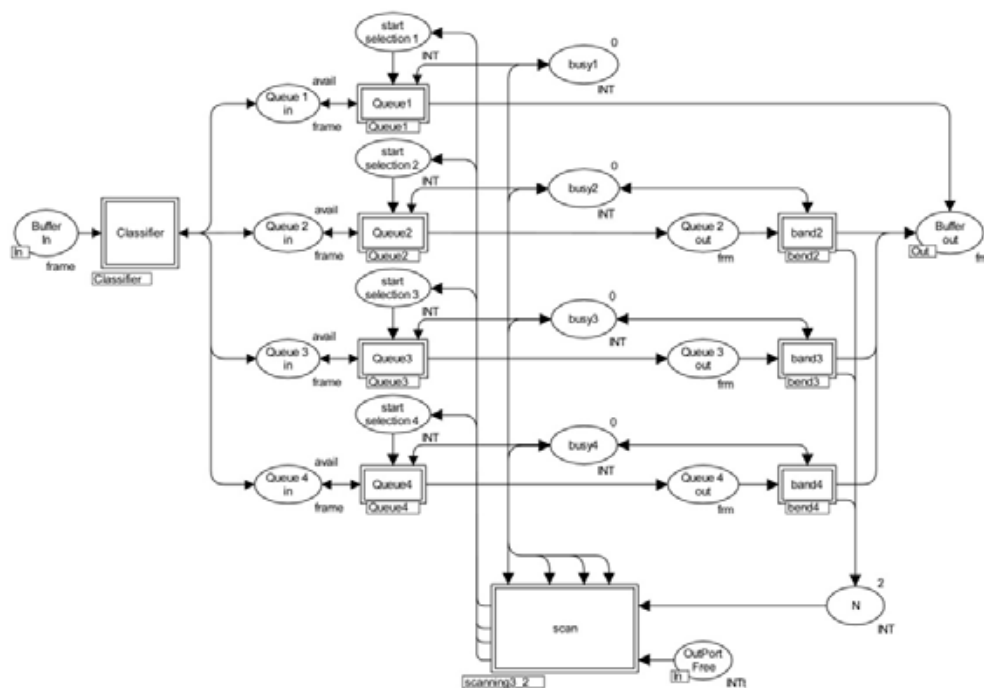


Рис. 7. Подсеть буфера

В модели используется сочетание приоритетного обслуживания очередей (Strictly Priority SP), которые обслуживаются в соответствии со своим приоритетом, и циклического обслуживания очередей. В модели используется взвешенное циклическое обслуживание (Weighted Round Robin WRR) для очередей BE-кадров [18–19]. Алгоритм WRR разработан для того, чтобы можно было предоставить всем классам трафика определенный минимум пропускной способности или гарантировать некоторые требования к задержкам. Под весом данного класса понимается процент предоставляемой классу трафика пропускной способности от полной пропускной способности выходного интерфейса, полоса пропускания рассчитывается исходя из длины кадра.

Кадр поступает на входной порт коммутатора и затем идет в подсеть классификатора. Подсеть классификатора представлена на рис. 8. Классификатор обеспечивает работу в режиме ТТЕ и поддержки различных типов качества обслуживания.





Но в отличие от реализации подсети очереди, описанной в статьях [18–19], добавлен эффект задержки записи и чтения из очереди, поскольку в реальных системах запись и чтение из очереди происходят не мгновенно, а с небольшой задержкой. Тем самым подсеть очереди приближена к функционированию очереди в реальных коммутаторах. Задержка вычисляется следующим образом: кадр передается с задержкой, равной  $@+sz_{frm}$ . Устанавливается флаг занятости очереди в позиции *busy*.

Подсеть сканирования обслуживания очередей реализует комбинацию алгоритмов диспетчеризации SP + WRR [10]. Подсеть сканирования представлена на рис. 10. Запуск на разрешение приоритетного обслуживания очереди происходит путем установления маркера в позиции *start selection 1* при условии, что очередь № 1 не пуста.

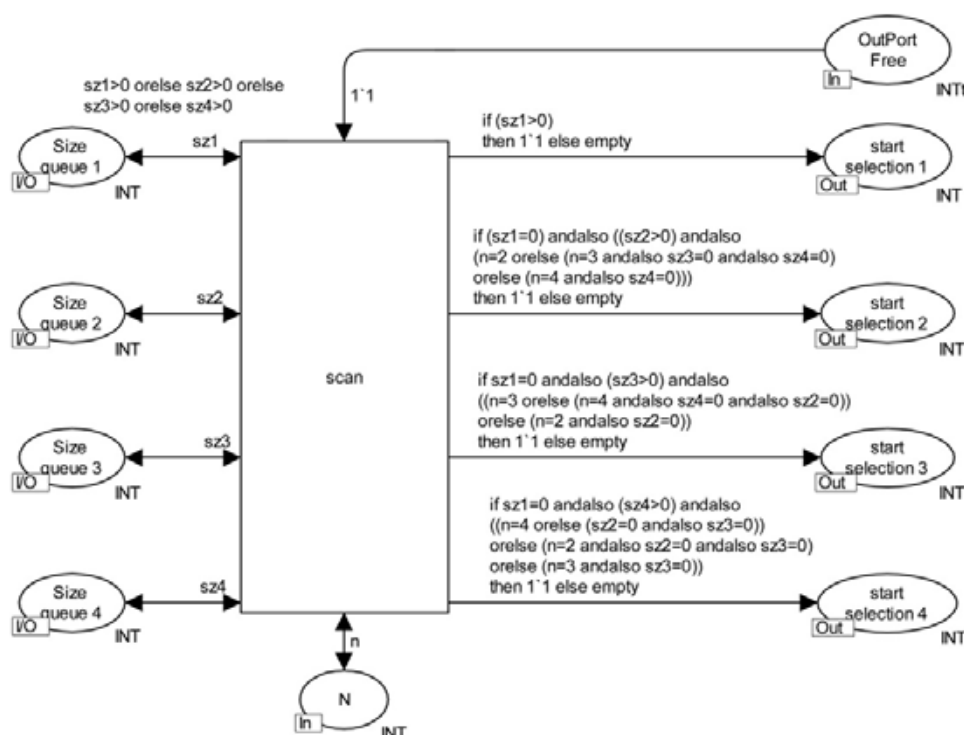


Рис. 10. Подсеть сканирования обслуживания очередей

Циклические алгоритмы диспетчеризации также реализуются на переходе *scan*. Данный переход срабатывает каждый раз, когда любая очередь не пуста и выходной порт коммутатора свободен (входной порт *OutPort Free* в подсети).

Сигналы запуска старта в позициях *start selection 2 – start selection 4* формируются следующим образом: должны быть определены соответствующие маркеры, которые учитывают цвет маркера в позиции *N*, который указывает на следующего кандидата для обслуживания и изменяется в подсети полосы пропускания канала.

Выражение сигнала запуска в позиции *start selection 2*:

*if (sz1 = 0) andalso ((sz2 > 0) andalso (n = 2 orelse (n = 3 andalso sz3 = 0 andalso sz4 = 0) orelse (n = 4 andalso sz4 = 0))) then 1 else empty*

Проверяется вторая очередь, она должна быть не пустой и кандидат для обслуживания должен быть равным 2, остальные две очереди (№ 3 и 4) должны быть пусты, тогда вырабатывается сигнал запуска для очереди № 2, иначе будет пустой маркер.

Подсеть полосы пропускания канала заключается в определении веса для установки полосы пропускания для каждой из очередей (№ 2–4). Очередь № 1 передает на выходной порт коммутатора кадр сразу же. Подсеть полосы пропускания канала представлена на рис. 11.

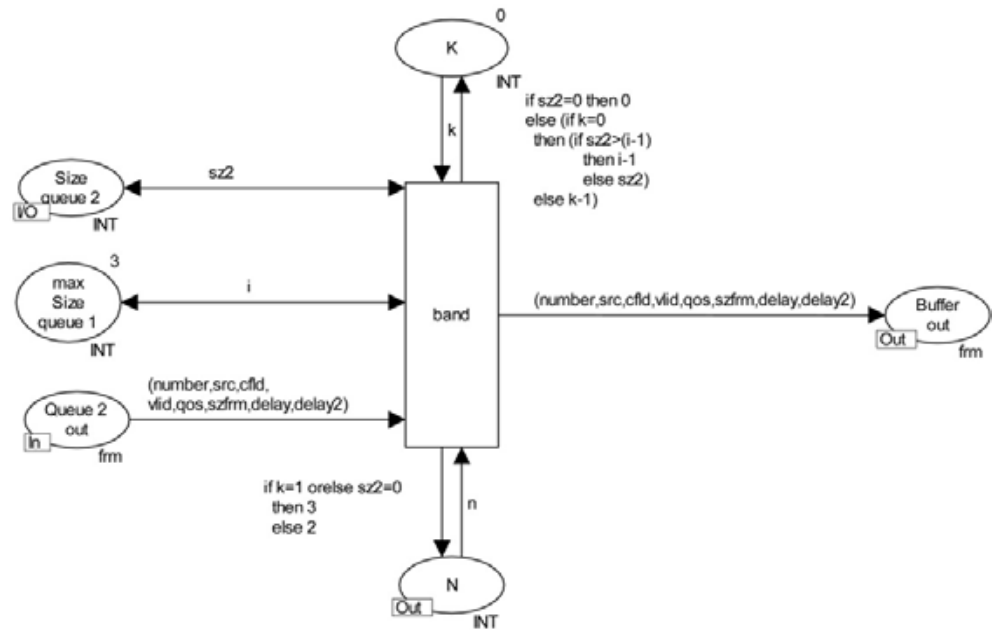


Рис. 11. Подсеть полосы пропускания канала

Подсеть полосы пропускания канала содержит следующие позиции:

- размер очереди (*Size queue*);
- максимальное количество кадров, которое может быть передано подряд (*Max Size queue*);
- передаваемый кадр (*Queue out*);
- количество передаваемых подряд кадров (*K*);
- номер следующей обрабатываемой очереди (*N*);
- выходной порт коммутатора (*Buffer out*).

При срабатывании перехода проверяется размер очереди *sz*, максимальное количество кадров, которое может быть передано подряд (переменная *i*), и количество передаваемых подряд кадров (переменная *k*). При этом выполняется пересчет количества передаваемых подряд кадров в выражении:

*if sz2 = 0 then 0 else (if k = 0 then (if sz2 > (i-1) then i-1 else sz2) else k-1)*

Представленное выше выражение означает, что если количество кадров, передаваемых подряд, равно 0, то выполняется сравнение размера очереди на пустоту и максимального количества передаваемых подряд кадров. Если количество кадров в очереди больше, чем разрешенное количество передачи кадров подряд, то в позицию  $K$  записывается значение из позиции *Max Size queue*, иначе записывается количество кадров в очереди. Если количество пакетов, передаваемых подряд, не равно 0, то это значение уменьшается на 1.

При этом выполняется вычисление следующей проверяемой очереди через вычисление выражения

$$if k = 1 \text{ or else } sz2 = 0 \text{ then } 3 \text{ else } 2$$

Данное выражение означает, что если количество передаваемых подряд кадров равно 1, то в позицию  $N$  ставится номер следующей обрабатываемой очереди, иначе записывается номер текущей очереди.

Подсеть выходного порта коммутатора представлена на рис. 12. Выходной порт рассчитывает задержку, необходимую для установления продолжительности межкадрового интервала.

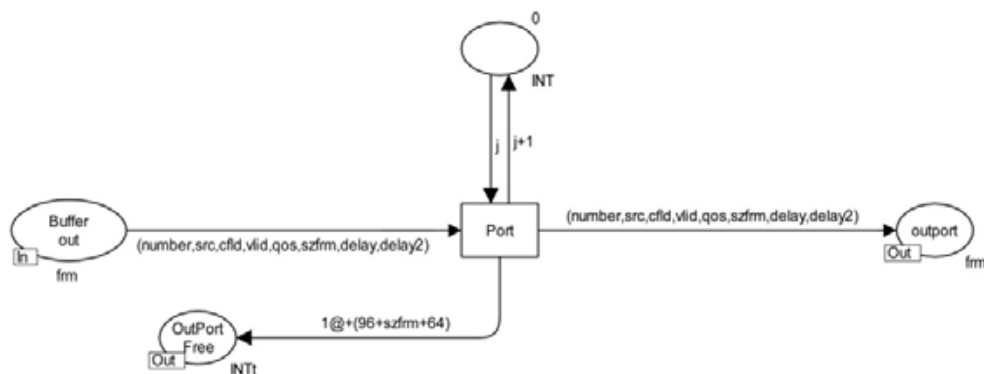


Рис. 12. Подсеть выходного порта коммутатора

На переходе *Port* написан монитор, представляющий собой инструмент пакета CPN Tools и позволяющий записывать полученные данные в файл. Данный файл можно обрабатывать для получения статистики в ходе экспериментов модели. Монитор выглядит следующим образом:

```
fun obsBindElem (OutPort'Port (1, {delay2,delay,cfld,vlid,j,number,qos,src,szfrm})) =
  Int.toString(number)^»,»^Int.toString(src)^»,»^Int.toString(cfld)^»,»^Int.toString(vlid)^»,»
  ^Int.toString(qos)^»,»^Int.toString(szfrm)^»,»
  «^Int.toString(delay)^»,»^Int.toString(GetTime()-delay)^»++\n
```

Данная функция представляет собой запись всех перечисленных полей цвета *frm* и запись задержки обработки кадра на выходе из коммутатора. Данный параметр позволяет оценить джиттер в модели.

После передачи кадра с выходного порта должен определиться адрес назначения доставки кадра. Определение адреса назначения основывается на двух таблицах: статическая конфигурируемая таблица уникальных индексов – происходит сравнение поля уникального идентификатора виртуальной связи кадра virtual link identifier (VL ID) со значением в таблице (для ТТ-кадров); для ВЕ-кадров тоже происходит сравнение только со статической таблицей адресов назначения. Более подробно сравнение по статическим таблицам описано в статье [16].

### ***Результаты работы модели***

Для проверки работы модели было уделено внимание формированию окна приема для трафика реального времени (ТТ-кадров). Входной трафик модели состоял из 3018 кадров. Выявлена корректная работа формирования окна приема кадра путем экспериментальной настройки некорректных временных параметров кадров. Настройка некорректных временных параметров кадров необходима для выявления непопадания кадра во временное окно, т.е. кадр пришел раньше начала окна приема и позже окончания приема кадра, и обработка корректной ситуации прибытия кадра осуществляется в строго определенное окно приема.

Экспериментальные данные ошибочных ситуаций представлены в табл. 1. В ходе моделирования выявлено четыре кадра из 3018 кадров, в ходе которых ТТ-кадр пришел не в строго отведенное окно приема.

Таблица 1

Кадры, не успевшие поступить во время окна приема

Кадр	Начало окна приема, модельное время	Окончание окна приема, модельное время	Ошибка
1\`(4,6,7,3,6,6408, 33939,0)	35 630	35 660	Кадр пришел раньше начала окна приема
1\`(449,6,7,2,4,816, 4480643,0)	4 480 603	4 480 633	Кадр пришел позже окончания окна приема
1\`(1346,6,0,3,2,512, 12731236,0)++	12 735 236	12 735 266	Кадр пришел раньше начала окна приема
1\`(2546,5,2,9,4,8824, 24697419,0)	24 697 380	24 697 410	Кадр пришел позже окончания окна приема

### ***Заключение***

Предложенная модель Time-Triggered Ethernet с использованием аппарата сетей Петри позволяет проанализировать работу функционирования телекоммуникационных компонентов сети ТТЕ. К телекоммуникационному оборудованию относятся коммутатор с заложенными алгоритмами диспетче-

ризации очередей, защитник системы, конечные системы сети (клиент, сервер), которые передают и принимают информацию по технологии ТТЕ.

Подробно рассмотрены особенности обработки ТТ-кадров и ВЕ-кадров.

Моделируется механизм работы защитника ТТЕ, учитывающего временные ограничения при формировании окна приема ТТ-кадра. Модель позволяет визуально наблюдать работу защитника как при обработке трафика реального времени, так и при обработке эластичного трафика.

Проведенные эксперименты с моделью показали адекватное отражение ею обработки исключительных ситуаций в случае непопадания момента прихода ТТ-кадра во временные рамки окна приема.

Предложенная модель будет полезна исследователям как при разработке аппаратуры ТТЕ (разработка новых алгоритмов диспетчеризации очередей в коммутаторе, улучшение и повышение параметров быстродействия работы защитника системы, повышение скорости передачи информации при реализации клиент-серверной архитектуры сети), так и для анализа исследования динамики работы конкретных реализаций автоматических систем, использующих технологию ТТЕ.

### *Библиографический список*

1. Obermaisser, R. Time-Triggered Communication / R. Obermaisser. – San Francisco : CRC Press, 2012. – P. 575.
2. Kopetz, H. The time-triggered Ethernet (tte) design / H. Kopetz, A. Ademaj, P. Grillinger, K. Steinhammer // Proc. of 8th IEEE International Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing (ISORC). – Washington, 2005. – P. 22–33.
3. Steinhammer, K. A time-triggered Ethernet (TTE) switch / K. Steinhammer, P. Grillinger, A. Ademaj, H. Kopetz // Proc. of the Conference on Design, Automation and Test in Europe (DATE). – Belgium, 2006. – P. 794–799.
4. Jensen, K. Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems / K. Jensen, L. M. Kristensen. – Berlin : Springer, 2009. – P. 384.
5. Описание программы CPN Tools. – URL: <http://cpntools.org/> (дата обращения: 15.05.2017).
6. SAE Standard AS 6802: Time-Triggered Ethernet. – SAE International, 2011. – P. 108.
7. Разработки и продукты time-triggered Ethernet. – URL: <https://www.tttech.com> (дата обращения: 16.05.2017).
8. Никишин, К. И. Перспективность использования технологии Time-Triggered Ethernet // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 8-1 (19-1). – С. 90–92.
9. Никишин, К. И. Основные принципы сетевой технологии Time-Triggered Ethernet / К. И. Никишин // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (МНПК – 2016) : сб. ст. III Ежегодной межвуз. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 166–169.
10. Kizilov, E. Modeling of QoS in the industrial Ethernet switches / E. Kizilov, N. Kononov, D. Pashchenko, D. Trokoz // The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE). – Moscow, 2015. – P. 185–190.
11. Никишин, К. И. Механизм управления трафиком реального времени в коммутаторе Ethernet / К. И. Никишин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 10 – С. 32–37.

12. Никишин, К. И. Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри / К. И. Никишин, Н. Н. Коннов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 299–307.
13. Зайцев, Д. А. Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools : учеб. пособие по курсу «Математическое моделирование информационных систем» для подготовки магистров в отрасли связи / Д. А. Зайцев, Т. Р. Шмелева. – Одесса, 2008. – С. 68.
14. Nikishin, K. Modelling of systems using Time-Triggered Ethernet / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // Information Technologies and Mathematical Modelling – Queueing Theory and Applications. Of the series Communications in Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 638. – P. 303–314.
15. Никишин, К. И. Моделирование систем на базе технологии Time-Triggered Ethernet / К. И. Никишин, Н. Н. Коннов, Д. В. Пашченко // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ–2016) : материалы XV Междунар. конф. им. А. Ф. Терпугова. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2016. – Ч. 2. – С. 117–122.
16. Никишин, К. И. Разработка системы Time-Triggered Ethernet / К. И. Никишин // Новые информационные технологии и системы : сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 174–176.
17. Никишин, К. И. Разработка защитника системы Time-Triggered Ethernet / К. И. Никишин // Новые информационные технологии и системы : сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 176–179.
18. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames / E. Kizilov, N. Konnov, K. Nikishin, D. Pashchenko, D. Trokoz // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 44 – P. 01011-p.1-01011-p.
19. Никишин, К. И. Разработка устройства диспетчеризации очередей для телекоммуникационных систем / К. И. Никишин // Вестник Пензенского государственного университета. – 2016. – № 1 (13). – С. 41–43.

---

***Никишин Кирилл Игоревич***

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: kirillnikmail@mail.ru

***Nikishin Kirill Igorevich***

postgraduate student,  
Penza State University

***Коннов Николай Николаевич***

кандидат технических наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: knn@pnzgu.ru

***Konnov Nikolay Nikolayevich***

candidate of technical sciences, professor,  
sub-department of computer science,  
Penza State University

---

УДК 681.31

**Никишин, К. И.**

**Моделирование сетями Петри коммуникационного оборудования Time-Triggered Ethernet / К. И. Никишин, Н. Н. Коннов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 2 (22). – С. 222–236.**