

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕХАНИЗМ ПЕРЕДАЧИ ТРАФИКА ЖЕСТКОГО РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В СЕТИ ETHERNET

Аннотация.

Актуальность и цели. В современных автоматических системах управления большую роль играют передача данных и реакция пользователя на изменение системы. Обмен данными происходит по технологии *Ethernet*. Однако технология *Ethernet* не позволяет обрабатывать трафик реального времени с минимальной задержкой, для этих целей предусмотрена технология *Time-Triggered Ethernet (TTE)*. Технология *TTE* обеспечивает передачу трафика реального времени с точностью до микросекунды. Объект исследования – передача *Ethernet*-сообщений с поддержкой технологии *TTE*. Предмет исследования – задержка кадров при передаче сообщений по сети. Цель исследования – разработка нового способа передачи *Ethernet*-сообщений в распределенной системе жесткого реального времени, который упростит подключение пользовательской аппаратуры, уменьшит задержку кадров в сети и исключит временные конфликты между *Ethernet*-сообщениями различного класса.

Материалы и методы. Исследования передачи стандартных кадров (эластичный трафик) и кадров реального времени (трафик реального времени) проведены по технологии *TTE*.

Результаты. Разработан новый способ передачи *Ethernet*-сообщений в распределенной системе жесткого реального времени, который позволяет уменьшить задержку кадров в сети, повысить пропускную способность сети, исключить временные конфликты между *TT*- и *ET*-кадрами, упростить подключение пользовательской аппаратуры за счет исключения защитника системы на выходные порты коммутатора, непосредственно обеспечивающего доставку кадров по адресатам назначения.

Выводы. Разработанный новый способ по технологии *TTE* повышает быстродействие при передаче сообщений в автоматических системах управления, позволяет исследователям и разработчикам телекоммуникационного оборудования спроектировать новую систему по передаче данных с использованием технологии *TTE*.

Ключевые слова: Time-Triggered Ethernet, трафик реального времени, задержка кадра, планировщик расписания, сеть Петри.

К. И. Nikishin, N. N. Konnov, E. I. Gurin

AN IMPROVED MECHANISM OF TRANSMISSION OF HARD REAL-TIME TRAFFIC IN THE ETHERNET

Abstract.

Background. Data transmission and user response to the system change play a big role in the modern automatic control systems (ACS). Data exchange takes place

over the Ethernet technology. However, the Ethernet technology does not allow to process real-time traffic with minimal delay, for this purpose the Time-Triggered Ethernet is provided. The Time-Triggered Ethernet (TTE) is used for transmission of real-time traffic with microsecond accuracy. The object of research is the transmission of Ethernet messages with support of TTE technology. The subject of the research is frame delay in the transmission of messages over the network. The purpose of the research is development of a new method of transmission of Ethernet messages in a distributed hard real-time system, which will simplify the connection of user hardware, reduce the frame delay in the network and exclude time conflicts between the Ethernet messages of different class.

Materials and methods. Research of transmission of standard frames (elastic traffic) and real-time frames (real-time traffic) by TTE technology.

Results. The new method of transmission of Ethernet messages in a distributed hard real-time system is developed, which allows to reduce the delay of frames in the network, increase the network bandwidth, exclude time conflicts between TT- and ET-frames, simplify the connection of user hardware by excluding the system guardian on the output ports of the switch, directly providing transfer of frames to the destination.

Conclusions. The new developed method of TTE technology will improve the performance in the transmission of messages to the ACS, will allow researchers and developers of telecommunications equipment to design a new system for data transfer using TTE technology.

Keywords: Time-Triggered Ethernet, real-time traffic, frame delay, scheduler, Petri nets.

Введение

На сегодня самой распространенной сетевой технологией по передаче данных является технология *Ethernet*. Существует много вариаций стандарта *Ethernet*, в том числе с поддержкой качества обслуживания (*Quality of Service*). Технология *Ethernet* не позволяет обрабатывать трафик реального времени с минимальной задержкой, что приводит к появлению большого разброса джиттера.

Для передачи сообщений трафика реального времени с точностью до микросекунды в распределенной системе жесткого реального времени используется технология *Time-Triggered Ethernet (TTE)*, которая основывается на парадигме коммуникации срабатывания по времени [1–2]. Технология *TTE* применяется в таких автоматических системах управления (АСУ), где задержка передачи данных по сети критична: в авиационной, аэрокосмической, железнодорожной, транспортной, автомобильной, военной и промышленной сферах.

В статье предлагается усовершенствованный способ передачи *Ethernet*-сообщений в распределенной системе жесткого реального времени по технологии *TTE – Schedule Time-Triggered Ethernet (STTE)*. Механизм *STTE* позволяет упростить подключение пользовательской аппаратуры, уменьшить задержку кадров в сети и исключить временные конфликты между *Ethernet*-сообщениями различного класса.

1. Особенности *Time-Triggered Ethernet*

Стандарт *TTE* [3] разделяет все передаваемые сообщения на два вида:

- сообщения, которые срабатывают по времени (*TT*-кадр);
- сообщения, которые срабатывают по событию (*ET*-кадр).

Таким образом, технология *TTE* работает с двумя видами трафика: трафик реального времени, который передает *TT*-сообщения, и стандартный (эластичный) трафик, который передает кадры стандартной технологии *Ethernet*, при этом обеспечивается преемственность со стандартом *IEEE 802.3* [4].

TT-кадры жестко синхронизированы по времени через глобальное время системы и обрабатываются с минимальной или заданной задержкой. *TT*-кадр определяется системой по идентификатору в сообщении.

ET-кадры относятся к эластичному трафику и не имеют жестких ограничений по времени доставки. *ET*-кадры передаются как обычные кадры технологии *Ethernet*.

Технология *TTE* основывается на понятиях «слот», «раунд», «цикл». Для каждого кадра реального времени создается свой виртуальный таймслот, который координируется через *TDMA*-раунды, реализующие режим множественного доступа с временным разделением (*TDMA*) для *TT*-кадров (рис. 1).

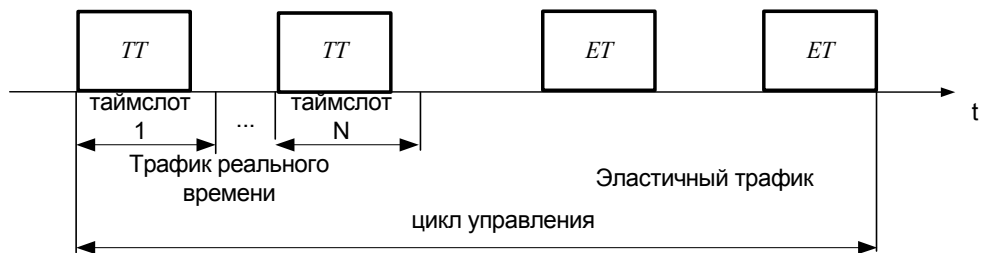


Рис. 1. Расположение *Ethernet*-сообщений по таймслотам в цикле управления

Задержка *TT*-кадра передается в формате кадра, она контролируется аппаратным защитником системы [5].

Недостатками технологии *TTE* являются:

- аппаратные средства на сбор, вычисление, хранение константной задержки в формате *TT*-кадра, а также затраты на подключение пользовательской аппаратуры через специальное устройство «защитник системы»;
- прерывание *ET*-кадра в случае временного конфликта между *ET*- и *TT*-кадрами в коммутаторе, что приводит к уменьшению пропускной способности сети из-за повторной передачи прерванного *ET*-кадра. Появляется дополнительная нагрузка вычислительных средств на передатчик по контролю за временем отправления;
- отсутствие возможности передачи нескольких кадров, направленных к разным портам, в одном таймслоте.

2. Усовершенствование технологии *Time-Triggered Ethernet*

Устранение отмеченных выше недостатков классической технологии *TTE* обеспечивается предлагаемым авторами алгоритмом *STTE*, укрупненная схема работы которого представлена на рис. 2. Основная идея алгоритма *STTE* заключается в реализации функций по обеспечению доставки *TT*-кадров абоненту согласно заранее установленному расписанию не защитником системы, реализующим селекцию кадров на входе коммутатора, а непосредственно коммутатором *Ethernet* на его выходном порту.

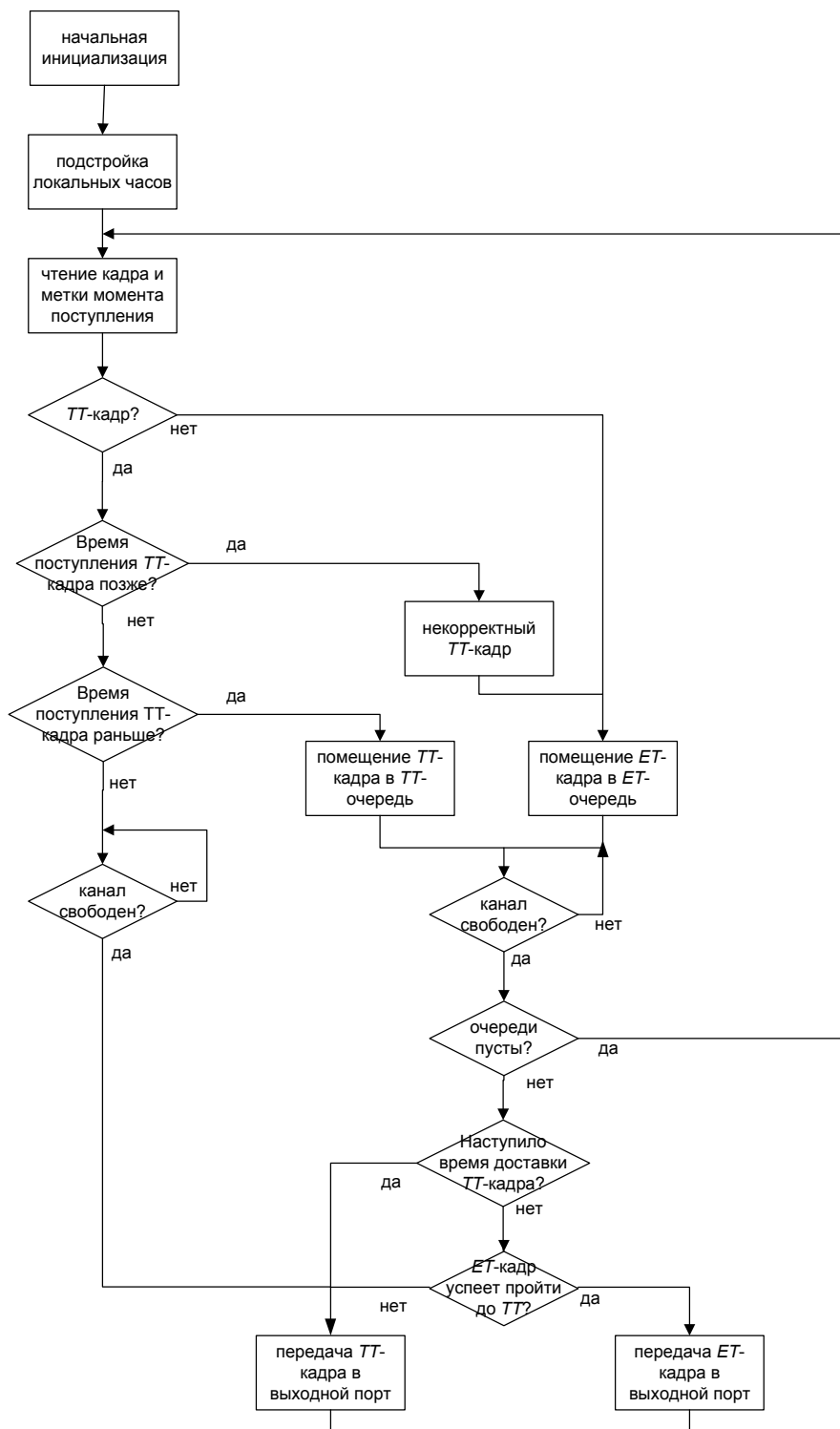


Рис. 2. Алгоритм работы STTE

При запуске системы выполняется конфигурирование, заключающееся в задании планировщика расписаний каждому сетевому узлу и задании пара-

метров подстройки временных окон приема *ТТ*-кадров, установки тайм-слотов в циклическом алгоритме управления. Коммутатор выполняет рассылку широковещательного *ТТ*-кадра, содержащего значение локального времени, по которому происходят подстройка локальных часов сетевых узлов и их синхронизация.

Принятый коммутатором кадр продвигается в планировщик расписания, где классифицируется по типу трафика (*ЕТ*- или *ТТ*-кадр). После этого фиксируется момент поступления каждого *ТТ*-кадра, значение которого сравнивается с установленным значением момента его доставки расписанием. Если момент прибытия кадра позже заранее известного времени, зависящего от времени доставки, то *ТТ*-кадр помечается как некорректный.

Для каждого выходного порта коммутатора контролируется время доставки поступивших в него *ТТ*-кадров, где:

- если текущий момент поступления *ТТ*-кадра равен значению времени доставки в расписании, то выполняется передача принятого *ТТ*-кадра на выходной канал, даже если его буферизация не закончена;
- если текущий момент поступления *ТТ*-кадра меньше значения времени доставки в расписании, то *ТТ*-кадр помещается в специальный отдельный буфер (очередь).

ЕТ-кадры классифицируются по классу качества обслуживания и записываются в отдельные очереди соответствующих классов, при этом снабжаются метками, указывающими на размер кадра. Таймер проверяет наступление момента доставки очередного *ТТ*-кадра, и если время доставки *ТТ*-кадра не наступило, таймер передает управление диспетчеру очередей.

Диспетчер запускается при появлении непустых очередей и освобождении выходного канала и проверяет возможность передачи *ЕТ*-кадра до того, как наступит момент доставки очередного *ТТ*-кадра:

$$T_{\text{тек}} + T_{\text{ЕТ}} \leq T_{\text{бл}} + T_{\text{ТТ}},$$

где $T_{\text{тек}}$ – текущее время в системе; $T_{\text{ЕТ}}$ – время передачи *ЕТ*-кадра с учетом его длины; $T_{\text{бл}}$ – время блокировки; $T_{\text{ТТ}}$ – время передачи *ТТ*-кадра.

Таким образом, возможность передачи *ЕТ*-кадра определяется исходя из условия, что текущий момент времени системы и длина *ЕТ*-кадра должны быть меньше наступления момента доставки очередного *ТТ*-кадра:

- запускается передача *ЕТ*-кадра из выбранной очереди в выходной канал;
- иначе ожидается момент доставки очередного *ТТ*-кадра, и когда он наступает, осуществляется передача очередного *ТТ*-кадра из выбранной очереди в выходной канал.

Затем обработка снова переходит к планировщику расписания, где он заново продвигает следующий кадр в коммутатор.

Функционирование устройства, реализующего механизм *STTE*, структурная схема которого показана на рис. 3, заключается в следующем:

1. По шине приема поступают кадры из аппаратуры продвижения кадров в порт назначения коммутатора, направленные в данный порт.
2. Текущий момент поступления *ТТ*-кадра сравнивается с моментом доставки в планировщике расписания. Планировщик расписания представля-

ет собой память (набор регистров), в которой хранятся значения моментов доставки *ТТ*-кадров.

3. Таймер проверяет момент доставки *ТТ*-кадров. Планировщик расписания может либо передавать *ЕТ*-кадр или некорректный *ТТ*-кадр в классифицирующее устройство (классификатор), либо помещать *ТТ*-кадр в очередь *ТТ*-кадров (текущий момент *ТТ*-кадра меньше момента его доставки), либо передавать *ТТ*-кадр сразу же в выходной канал (текущий момент *ТТ*-кадра равен моменту его доставки).

4. Классификатор классифицирует *ЕТ*-кадры в зависимости от типа трафика и помещает в очередь *ЕТ*-кадров.

5. Кадры записываются по шине записи, а считываются из очередей по шине чтения. Таймер постоянно проверяет наступление момента доставки *ТТ*-кадра и передает управление диспетчеру очередей.

6. Диспетчер запускается сигналами: сигнал «очереди не пусты» и сигнал «выходной канал свободен». Осуществляется передача кадров в выходной канал.

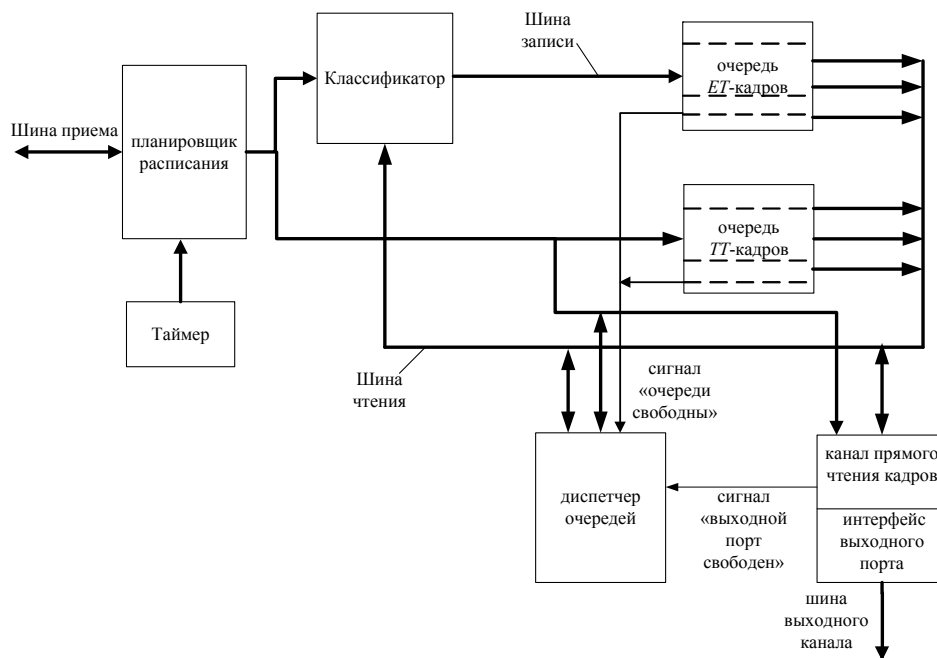


Рис. 3. Структура устройства, реализующего механизм *STTE*

Отличительными особенностями механизма *STTE* являются:

- коммутатор обеспечивает доставку *ТТ*-кадров получателю в заранее назначенные моменты времени по расписанию, устанавливаемому заранее для каждого выходного порта коммутатора специальными конфигурационными кадрами, при этом моменты времени доставки кадров и расписания устанавливаются относительно начала цикла управления;

- принятый коммутатором кадр продвигается в выходной порт назначения, где классифицируется по типу трафика, кадры *ЕТ*- и *ТТ*-трафика помещаются в отдельные специальные буфера, при этом фиксируется момент поступления каждого *ТТ*-кадра, значение которого сравнивается с установ-

ленным значением момента его доставки расписанием, и в случае прибытия кадра позже заранее известного времени, зависящего от времени доставки, он помечается как некорректный;

- для каждого выходного порта коммутатора контролируется время доставки поступивших в него *ТТ*-кадров и при достижении локального времени специального окна, определяемого соответствующим расписанием, выполняется передача буферизируемого *ТТ*-кадра, даже если его буферизация не закончена;

- для каждого момента доставки *ТТ*-кадров, указанных в расписании, вычисляется время блокировки начала передачи *ЕТ*-кадров, величина которого определяется максимальной длиной *ЕТ*-кадра, при этом очередная блокировка снимается после передачи очередного корректного *ТТ*-кадра, в случае некорректного *ТТ*-кадра блокировка снимается при окончании специального окна или отсутствии поступления очередного *ТТ*-кадра;

- передача *ЕТ*-кадра из соответствующего буфера выходного порта коммутатора разрешается после передачи каждого *ТТ*-кадра при условии отсутствия блокировки;

- коммутатор выполняет рассылку широковещательного *ТТ*-кадра, содержащего значение локального времени, по которому происходят подстройка локальных часов сетевых узлов и их синхронизация;

- некорректные *ТТ*-кадры передаются как *ЕТ*-кадры.

Работу механизма *STTE* иллюстрируют временные диаграммы, показанные на рис. 4.

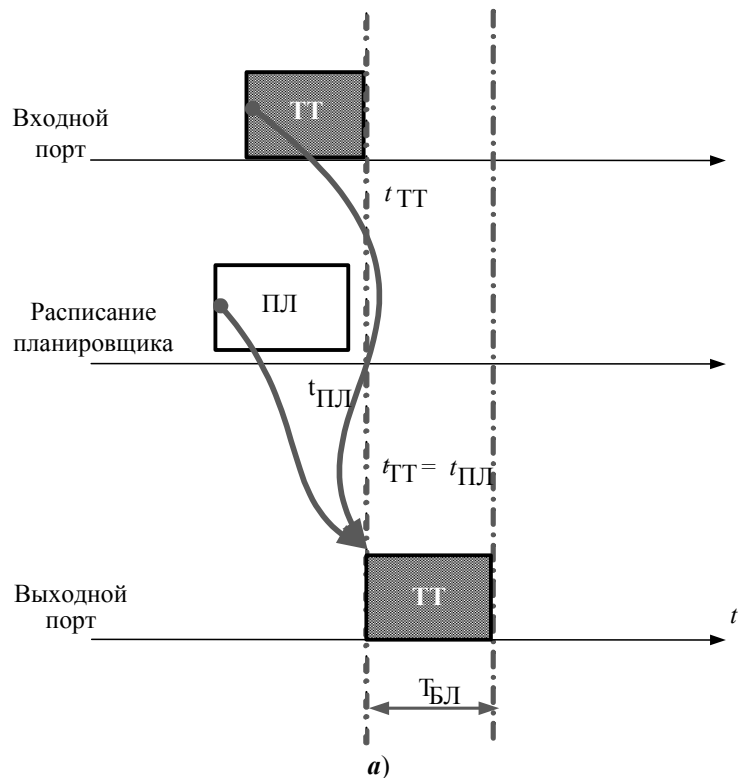


Рис. 4. Временные диаграммы работы механизма *STTE*

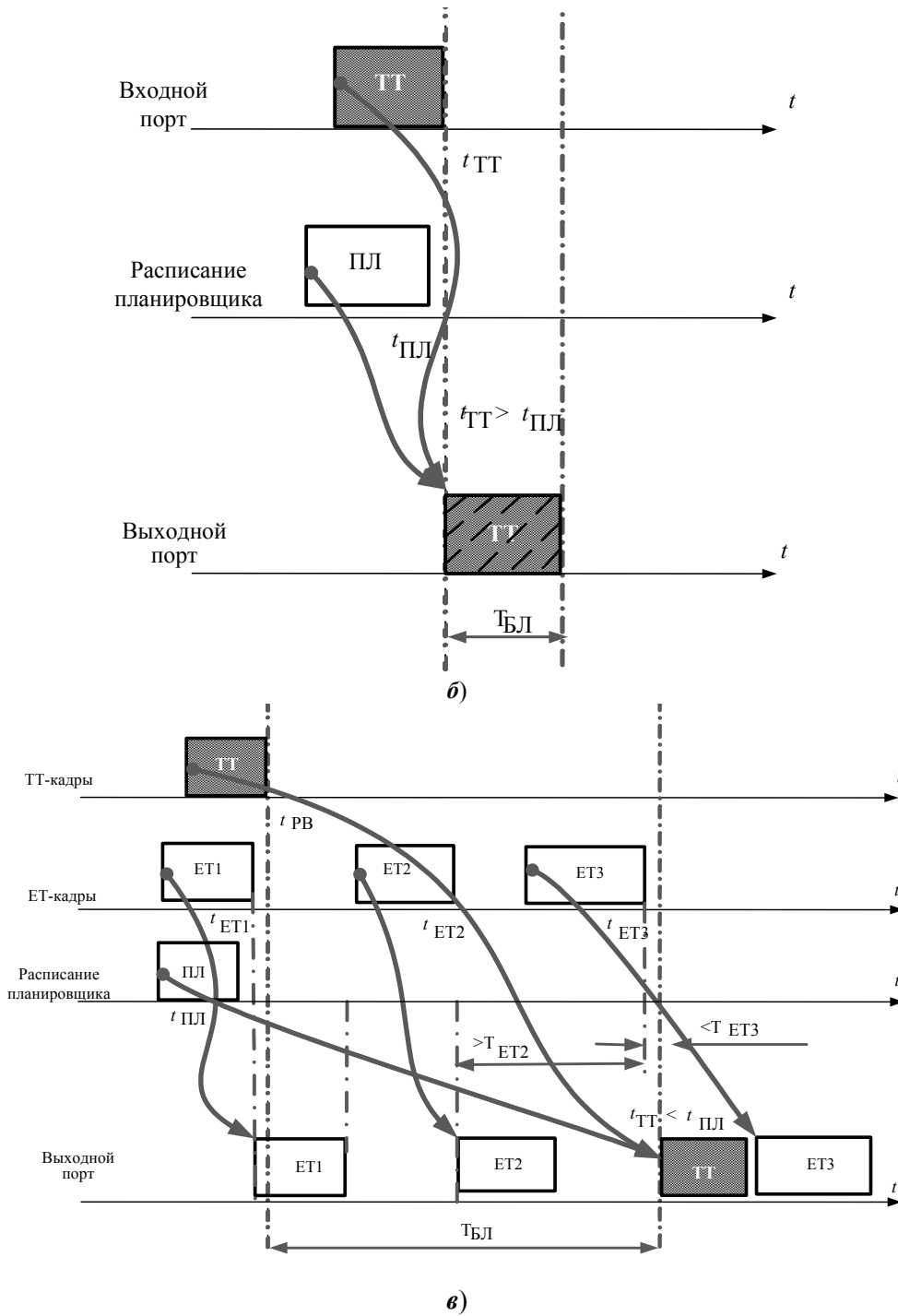


Рис. 4. Окончание

Текущий момент поступления $ТТ$ -кадра сравнивается с моментом доставки данного $ТТ$ -кадра в расписании планировщика (ПЛ), и:

- если оба момента равны ($t_{ТТ} = t_{ПЛ}$), то $ТТ$ -кадр передается сразу же в выходной канал (рис. 4,а);

- если момент поступления TT -кадра больше момента доставки в расписании ($t_{TT} > t_{ПЛ}$), то TT -кадр помечается как некорректный и передается как ET -кадр (рис. 4,б);

- если момент поступления TT -кадра меньше момента доставки в расписании ($t_{TT} < t_{ПЛ}$), то проверяется возможность передачи ET -кадра: текущий момент времени системы и длина ET -кадра должны быть меньше наступления момента доставки TT -кадра ($t_{БЛ} > t_{ET2}$), тогда осуществляется передача ET -кадра, иначе когда ($t_{БЛ} < t_{ET3}$), ET -кадр передается только после передачи TT -кадра (рис. 4,в).

Алгоритмы были верифицированы [6–8] путем их имитационного моделирования с использованием математического аппарата иерархических временных цветных сетей Петри [9] с помощью свободно распространяемого пакета *CPN Tools*. Пакет *CPN Tools* позволит оценить задержку кадров [10] при передаче данных по сети.

Заключение

Предложенный механизм *STTE* позволяет уменьшить задержку кадров в сети, повысить пропускную способность сети, исключить временные конфликты между TT - и ET -кадрами, упростить подключение пользовательской аппаратуры за счет исключения защитника системы на выходные порты коммутатора, непосредственно обеспечивающего доставку кадров по адресатам назначения.

Предложена структура устройства, реализующего механизм *STTE*, детально представлены все основные узлы системы. Структурная реализация позволит разработчикам телекоммуникационного оборудования спроектировать систему с предложенным механизмом *STTE*.

Разработанный механизм *STTE* будет полезен исследователям как при разработке аппаратуры *TTE* (разработка новых алгоритмов диспетчеризации очередей в коммутаторе, улучшение и повышение параметров быстродействия работы системы), так и для анализа исследования динамики работы конкретных реализаций автоматических систем управления, использующих технологию *TTE*.

Библиографический список

1. Time-Triggered Communication / ed. by R. Obermaisser. – San Francisco, California, USA : CRC Press, 2012. – P. 575.
2. **Kopetz, H.** The time-triggered Ethernet (tte) design / H. Kopetz, A. Ademaj, P. Grillinger, K. Steinhammer // Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05) (May 18, 2005 to May 20, 2005). – Seattle, Washington, 2005. – P. 22–33.
3. SAE Standard AS 6802: Time-Triggered Ethernet. Описание стандарта IEEE 802.1q. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q (дата обращения: 15.02.2018).
4. **Никишин, К. И.** Разработка защитника системы Time-Triggered Ethernet / К. И. Никишин // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2016) : сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 176–179.
5. **Nikishin, K.** Modelling of systems using Time-Triggered Ethernet / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // Information Technologies and Mathematical Modelling. – 2016. – Vol. 638. – P. 303–314.

6. **Nikishin, K.** Implementation of Time-Triggered Ethernet using colored Petri net / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // IEEE Xplore (ICIEAM). – URL://http://ieeexplore.ieee.org/ document/8076387/ (дата обращения : 17.02.2018).
7. **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.
8. **Jensen, K.** Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems / K. Jensen, L. M. Kristensen. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag 2009. – 2009.
9. **Таранцев, Е. К.** Моделирование цветными сетями Петри процесса регистрации радиолокационной информации / Е. К. Таранцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 70–78.

References

1. *Time-Triggered Communicatio*. Ed. by R. Obermaisser. San Francisco, Caifornia, USA: CRC Press, 2012, p. 575.
2. Kopetz H., Ademaј A., Grillinger P., Steinhammer K. *Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05) (May 18, 2005 to May 20, 2005)*. Seattle, Washington, 2005, pp. 22–33.
3. *SAE Standard AS 6802: Time-Triggered Ethernet. Description of the standard IEEE 802.1q*. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q (accessed Febr. 15, 2018).
4. Nikishin K. I. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy (NITiS-2016): sb. nauch. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [New information technologies and systems 2016: proceedings of XI International scientific and practical conference]. Penza: Izd-vo PGU, 2016, pp. 176–179.
5. Nikishin K., Konnov N., Pashchenko D. *Information Technologies and Mathematical Modelling*. 2016, vol. 638, pp. 303–314.
6. Nikishin K., Konnov N., Pashchenko D. *IEEE Xplore (ICIEAM)*. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/ document/8076387/> (accessed Febr. 17, 2018).
7. Nikishin K. I., Konnov N. N. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economy, technology, nature and society]. 2017, no. 2 (22), pp. 222–236.
8. Jensen K., Kristensen L. M. *Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2009, 2009.
9. Tarantsev E. K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 1 (17), pp. 70–78.

Никишин Кирилл Игоревич

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kirillnikmail@mail.ru

Nikishin Kirill Igorevich

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Коннов Николай Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: knn@pnzgu.ru

Konnov Nikolay Nikolaevich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department of computer
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Гурин Евгений Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: gurin2@yandex.ru

Gurin Evgeniy Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 681.3

Никишин, К. И.

Усовершенствованный механизм передачи графика жесткого реального времени в сети Ethernet / К. И. Никишин, Н. Н. Коннов, Е. И. Гурин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 28–38. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-3.