

Обеспечение гарантии доставки информации в бортовой сети космического аппарата на основе интерфейса SpaceWire

А. Ю. Кошелев, *koshelev.ay@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. М. Дианова, *dianova.am@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. О. Петухов, *petukhov.do@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время интерфейс SpaceWire рассматривается в качестве перспективного стандарта интерфейса передачи данных для применения в аэрокосмической отрасли. В данной работе произведен анализ обеспечения гарантии доставки информации в сетях, построенных на базе стандарта SpaceWire. В результате анализа работы сети с помощью программной модели были выявлены ключевые проблемы, не позволяющие использовать данный стандарт в сетях реального времени. Предложен метод обеспечения гарантии доставки информации в сети SpaceWire на базе маршрутизации по расписанию. Проведено программное моделирование модифицированной сети и получены результаты, подтверждающие применимость предложенного метода обеспечения гарантии доставки информации в сети.

Ключевые слова: SpaceWire, червячная маршрутизация, сеть реального времени, маршрутизация по расписанию, гарантия доставки информации

Guarantee of Information Delivery in the Spacecraft Onboard Network Based on the SpaceWire Interface

A. Yu. Koshelev, *koshelev.ay@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. M. Dianova, *dianova.am@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

D. O. Petukhov, *petukhov.do@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. Nowadays SpaceWire is regarded as a perspective aerospace data transmission interface standard. This paper gives an analysis of a guaranteed information delivery of SpaceWire networks. The result of the analysis showed key problems that did not allow using this standard in real-time networks. A method was developed and proposed to guarantee the information delivery in the SpaceWire network based on scheduled routing. Tests using a software model of the modified network were performed. The results obtained confirmed the efficiency of the method used to ensure the guarantee of information delivery in the network. It is shown that a network with a modified protocol stack meets real-time requirements.

Keywords: SpaceWire, wormhole routing, real-time network, scheduled routing, information delivery guarantee

Введение

Требования к современным интерфейсам передачи данных в бортовых космических системах во многом соответствуют требованиям к системам реального времени (СРВ), то есть предъявляется требование к временному детерминизму [1], что означает необходимость в детерминизме времени взаимодействия между элементами сети. В более ранних поколениях бортовой аппаратуры космических аппаратов (БА КА) требования СРВ обеспечивались дисциплиной вычислительного процесса в отдельных узлах и составных частях комплексов и систем БА КА. Однако с ростом функциональной и структурной сложности БА КА и КА в целом появилась необходимость применения развитой архитектуры БА с применением высокоскоростных интерфейсов передачи данных, для чего необходимо использование унифицированных подходов к обеспечению требований СРВ в бортовой сети.

При разработке перспективной БА КА активно внедряется интерфейс SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C (SpW) [2]. SpW представляет собой технологию высокоскоростной коммуникации, аналогичную функционалу протокола Ethernet. На рис. 1 представ-

лено сравнение стеков протоколов OSI [3], SpW и стека протоколов бытовой сети на основе TCP/IP и Ethernet.

Уровни стека протоколов реализованы в стандарте SpW до сетевого уровня, но существуют варианты дополнения стека протоколов SpaceWire транспортным уровнем в дополнительных узко-специализированных стандартах. Однако они либо не подходят в качестве общесетевого протокола сети управления БА КА, либо требуют модификацию оконечных устройств (ОУ) SpW. Передача сообщений в SpW осуществляется по маршрутам от источника до приемника сообщения. Размер пакета не имеет ограничений. Предусмотрены логическая, путевая и региональная логическая адресации.

Несмотря на то что стек протоколов SpW изначально позиционируется для применения в аэрокосмической отрасли, ему присущи некоторые недостатки, ведущие к проблемам при широком применении данного интерфейса в нагруженных бортовых сетях. Отсюда появляются попытки предложить способы дополнения стека протоколов SpW для обеспечения требований СРВ в современной БА КА. Поскольку в данной статье рассматривается дополнение стека протоколов SpW, то проблемы

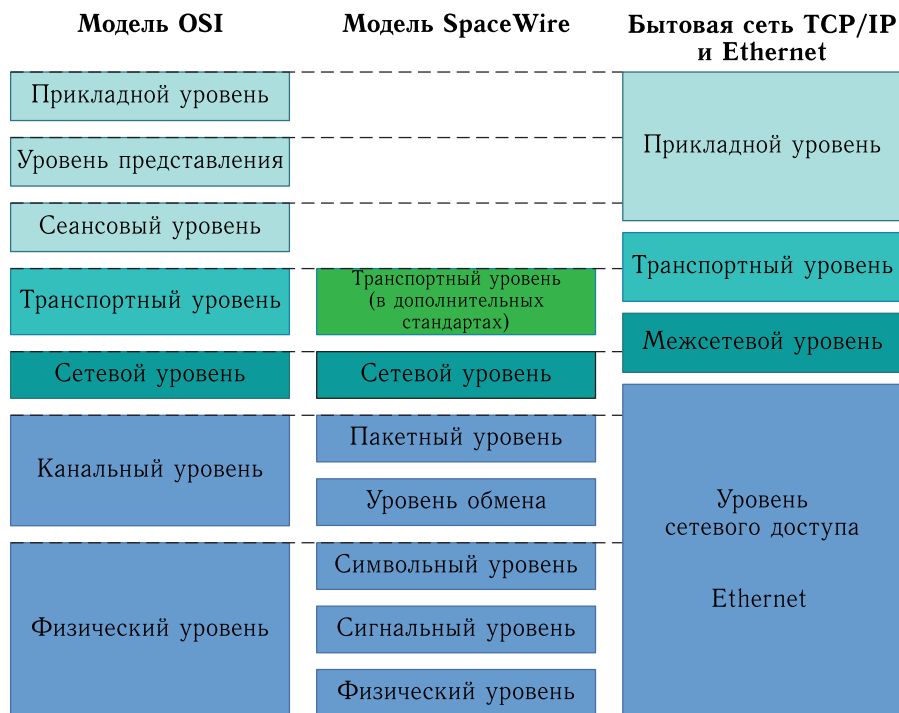


Рис. 1. Соответствие иерархических уровней моделей OSI, SpW и TCP/IP

физического уровня стека протоколов выносятся за скобки. В профессиональном сообществе обсуждаются ряд проблем SpW, которые не рассмотрены в стандарте, но являются принципиальными при разработке сложных комплексов и систем БА КА на его основе. Например, в работе [4] приведено рассмотрение ряда проблем интерфейса SpW. Одной из ключевых проблем, критически влияющих на качество функционирования сети, является червячная маршрутизация (wormhole routing, или wormhole switching). Данный тип маршрутизации применяется на сетевом уровне стека протоколов при рассмотрении интерфейса согласно модели OSI [5]. Такой способ маршрутизации исторически применяется для мультимедийных сетей и берет начало от червячной коммутации [6], применяющейся для построения мультипроцессорных систем, например транспьютеров. Реализация червячной маршрутизации в стеке протоколов SpW унаследовала проблемы червячной коммутации. При успешной передаче в сеть заголовка пакета происходит немедленная отправка оставшихся данных и канал передачи данных остается заблокированным до тех пор, пока не закончится передача всего пакета. Таким образом, в маршрутизирующих коммутаторах (МК) не требуется промежуточная буферизация, что существенно снижает требования к объемам памяти коммутирующих устройств по сравнению с другими способами коммутации. Однако простота принципа червячной маршрутизации приносит существенный недостаток, заключающийся в склонности к взаимным блокировкам: передача пакета большого объема может привести к длительным задержкам передачи других пакетов в сети. Кроме того, ошибки в заголовке и физические неисправности узлов могут привести к блокировкам. Систематическое возникновение блокировок делает невозможным гарантию доставки пакетов и гарантию времени доставки пакетов, что не соответствует принципам СРВ, которые важны при реализации систем ответственного применения.

Моделирование стандартной сети SpW

Воспроизведение сетевых коллизий в сети SpW осуществлялось с помощью программной математической модели сети SpW, выполненной в соот-

ветствии со стандартом [2]. Для моделирования использовались логические протоколы уровней обмена, пакетов и сети, а также упрощенный символичный уровень, регламентированные стандартом, без углубления в физическую составляющую. Программная модель представляет собой поведенческую модель системы, основанной на стандарте SpW [2]. Модель позволяет имитировать передачу данных между устройствами, связанными между собой дуплексными каналами (линками). В число решаемых задач входит:

- моделирование инициализации и установления канала связи между устройствами перед началом обмена данными;
- моделирование поведения устройств исходя из логических протоколов уровней обмена, пакетов и сети, а также упрощенного символического уровня, регламентированных стандартом, без углубления в физическую составляющую;
- моделирование режима обмена данными между оконечными устройствами, соединенными между собой с помощью маршрутизирующих коммутаторов.

С помощью программной модели проводились тесты с имитацией передачи данных в сети SpW с конфигурациями, приводящими к блокировке пакетов. Для проведения тестирования используется топология с тремя МК и двенадцатью ОУ, приведенная на рис. 2.

Моделирование проводилось для скорости обмена во всей сети 10 Мбит/с, что не влияет на принципы маршрутизации. МК поддерживают логическую адресацию, то есть каждый МК имеет свою заранее прописанную таблицу маршрутизации, в которой каждому физическому адресу ОУ сопоставлен выходной порт МК.

Ввиду детерминизма функционирования программной модели на ПЭВМ реализована следующая схема порядка передачи пакетов: в рамках одного МК первым передается пакет от ОУ с меньшим порядковым номером (физическим адресом), затем пакеты из портов, соединенных с портами других МК. В табл. 1 представлены параметры передаваемых сообщений.

На рис. 3 изображена временная диаграмма, точки которой иллюстрируют момент времени

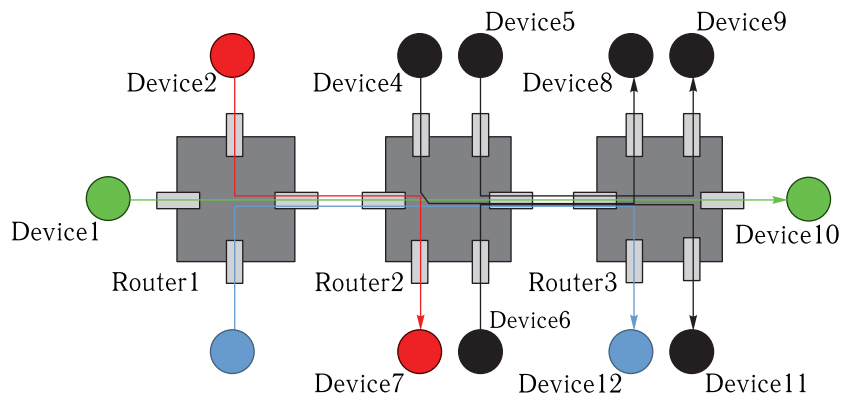


Рис. 2. Топология и схема передачи данных, используемые для проведения имитационного моделирования

Таблица 1. Параметры передаваемых сообщений

Номер передачи сообщения	Источник	Приемник	Размер сообщения	Минимальное время прохождения через линк, мс	Период передачи сообщения, мс
1	Device1	Device10	1 Кбайт	1	8
2	Device2	Device7	64 байта	0,064	10
3	Device3	Device12	64 байта	0,064	12
4	Device4	Device8	1 Кбайт	1	32
5	Device5	Device9	1 Кбайт	1	16
6	Device6	Device11	1 Кбайт	1	32

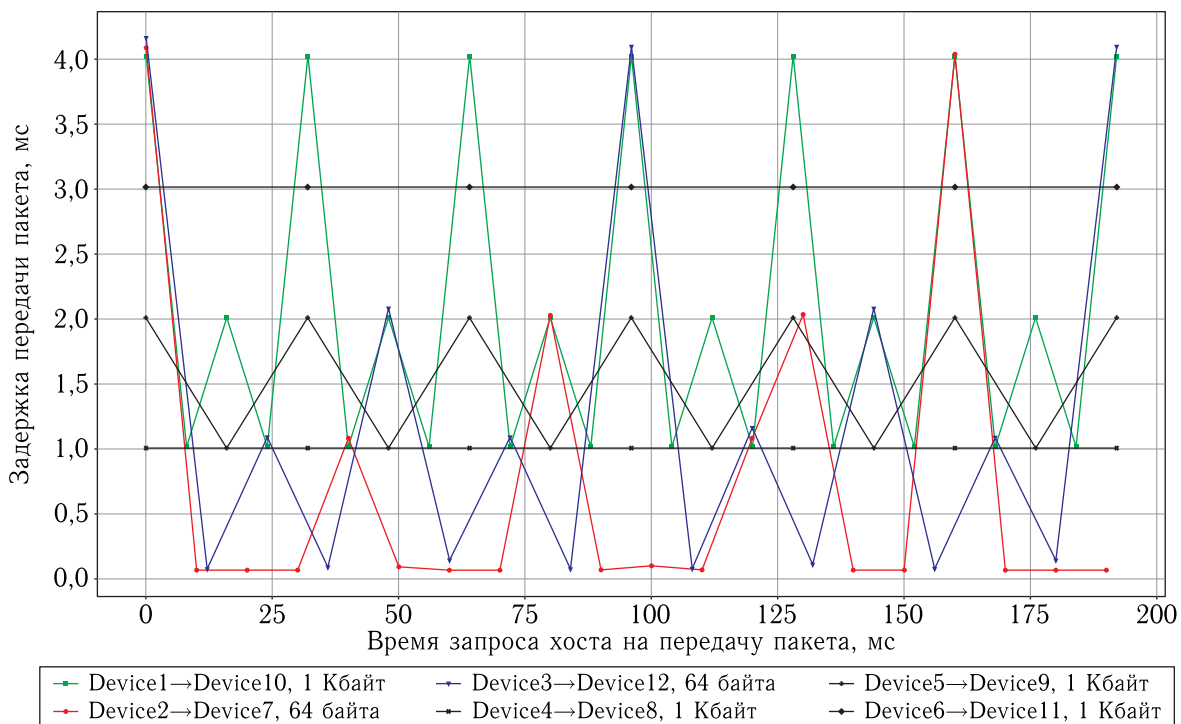


Рис. 3. Задержки, возникающие во время работы сети

запроса хоста на передачу пакета (или времени формирования пакета) и задержку в передаче данного пакета для шести передач согласно табл. 1, полученные в результате проведения моделирования. Время запроса хоста соответствует заданным периодам отправки сообщений.

Для пакета, не испытывающего блокировок при его передаче по сети, время задержки близко к минимальному времени прохождения через линк. Для таких пакетов все точки лежат на одной прямой с ординатой, соответствующей минимальному времени прохождения через линк. На данном графике такой характер имеет пакет 4 (черный цвет на графике). Задержка передачи пакета 6 является стабильной, но с превышением минимальной в 3 раза из-за постоянного блокирования передачи другими пакетами. Изменение задержки 5-го пакета носит периодичный характер. Период передачи данного пакета в два раза меньше, чем у 4-го пакета, который в очереди обработки находится раньше. При одновременных запросах хоста 5-й пакет блокируется, ожидая окончания передачи 4-го пакета. Пакет 1 (зеленый цвет на графике) проходит через два МК и периодически блокируется одним или двумя черными пакетами.

Наибольший интерес представляют два коротких пакета 2 (красный цвет на графике) и 3 (синий цвет на графике), которые имитируют короткие команды в сети управления. Пакет 2 проходит только через один МК, однако наблюдаются регулярные блокировки, превышающие минимальное время передачи больше чем в 60 раз из-за необходимости ожидания завершения передачи черных и зеленого пакетов. Пакет 3 проходит через два МК и блокируется, т.к. вынужден ожидать завершения передачи черных пакетов, красного и зеленого.

Результаты подтверждают обозначенные недостатки червячной маршрутизации, которая приводит к непостоянным запаздываниям в передаче информации, что осложняет применение SpW в системах или контурах управления ответственного применения, на которые распространяются требования системы реального времени. Результаты программного моделирования подтверждаются при проведении моделирования на реальной аппаратуре. В табл. 2 приведены полученные в хо-

де тестирования результаты. В данной сети осуществлялась передача пакетов размером 4 Кбайта в один порт и получение ответной квитанции подтверждения при скорости линка 10 Мбит/с.

Таблица 2. Результаты тестирования аппаратуры

Цикл источника S , мс	Время ожидания подтверждения от источника 1, мс	Время ожидания подтверждения от источника 2, мс
20/20	2,5–10	10–40
20/0	2,5–8	10–30
0/0	2,5–1000	10–50

В первом столбце таблицы показаны периоды передачи сообщений. Диапазон задержек времени ожидания ответной квитанции (пакета малого размера) обусловлен асинхронностью работы конечных устройств и логикой работы контроллера DMA (Direct Memory Address), что приближено к условиям применения в БА. Проведенное тестирование подтверждает наличие проблем для применения SpW в качестве сети управления.

Обозначенные недостатки стека протоколов сети SpW могут быть решены несколькими методами, а именно:

- 1) предъявлением дополнительных требований к дисциплине обмена каждого конечного устройства сети при разработке БА КА;
- 2) ограничением информационной нагрузки на сеть до уровня 10–15 %;
- 3) расширением стека протоколов SpW, реализующего другой принцип маршрутизации в коммутаторе сети, но при этом не требующего доработку конечных устройств, соответствующих стандарту SpW [2].

В данной статье рассматривается вариант выполнения стандартного стека протоколов SpW. Для подтверждения работоспособности предлагаемой концепции было проведено программно-математическое моделирование как согласно существующему стандарту SpW, так и с модифицированным коммутатором.

Моделирование модифицированной сети SpW

Как было сказано выше, сеть SpW может быть дополнена транспортным уровнем в рамках концепции стека протоколов иерархической модели OSI. Транспортный уровень должен привести в сеть SpW согласованность работы МК, позволяющей соблюсти необходимые условия передачи данных сети реального времени. Предлагаемый принцип представляет собой синхронную сеть SpW с данными (кадрами) фиксированного размера, которые передаются в определенные временные промежутки (тайм-слоты) согласно временному расписанию, в котором каждому передаваемому кадру (пакету) соответствует один временной слот на каждом порту каждого МК. Расписание, маршруты и задержки для передачи кадров рассчитываются заранее, что исключает возникновение коллизий в сети. Кроме того, составление расписания передач позволяет с максимальной эффективностью использовать ресурсы сети и осуществлять правильную расчетную групповую (multicast) доставку аналогично передаче Time-Code согласно SpW.

Предлагаемая логика протокола транспортного уровня является достаточно простой и не требует серьезных вычислительных ресурсов. Задача протокола транспортного уровня состоит в том, чтобы обеспечивать отправку сообщений строго по заранее заданному расписанию, обеспечивающему поведенческий и временной детерминизм каждого МК в сети. Для этого в каждом МК сети для этого вводится собственная «таблица расписания обмена сообщениями», регламентирующая все операции обмена, проходящие через порты МК. Таким образом, в каждый заданный интервал времени через каждый порт МК осуществляется передача только одного определенного сообщения.

Работа модифицированной сети SpW была симулирована на разработанной масштабируемой программной модели сети. В данной модели использовался аналогичный подход моделирования без углубления в символичный и физический уровни обмена. При моделировании сети был применен тот же тестовый пример, что и на рис. 4.

Результаты моделирования модифицированной сети показаны на рис. 4. Задержки пакетов в данном случае имеют прогнозируемый характер,

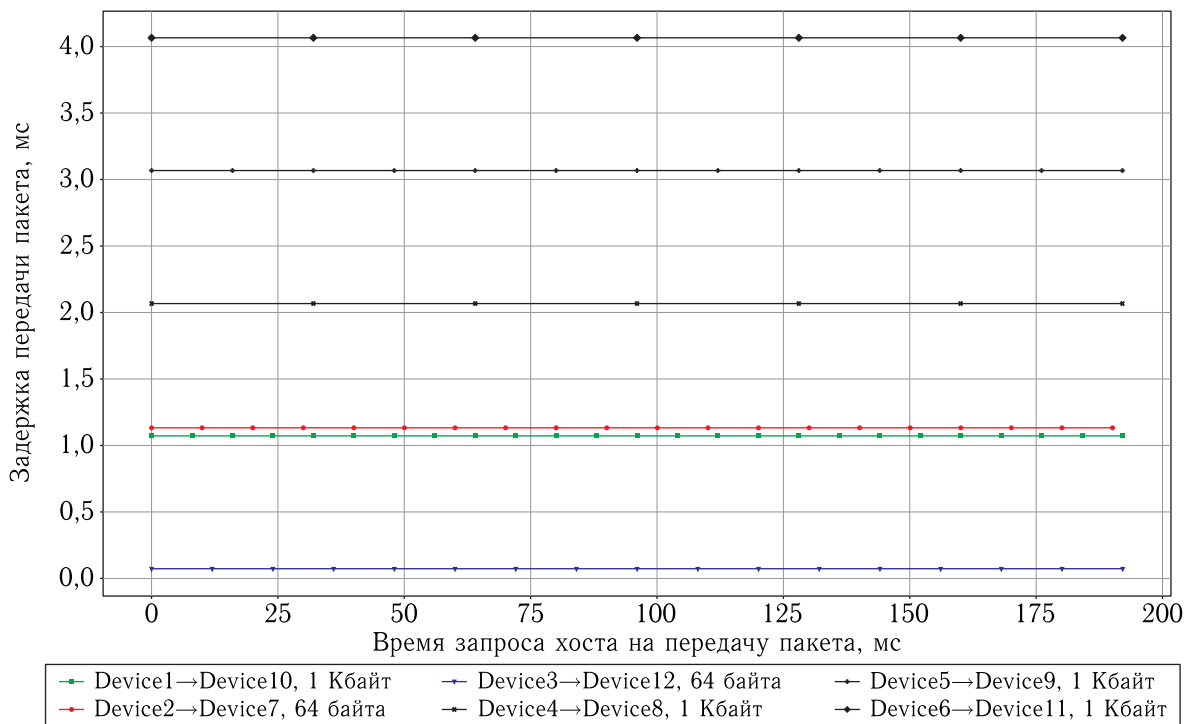


Рис. 4. Результаты работы модифицированной сети

постоянны и находятся в допустимых по величине пределах. Таким образом, сеть отвечает требованиям СРВ.

Выводы

Маршрутизация, основанная на временном расписании, позволяет бороться с блокировками в бортовой сети, а также поддерживать детерминированность системы и предоставлять гарантии доставки сообщений с фиксированными задержками, что крайне важно при реализации контуров управления. Предлагаемый протокол транспортного уровня маршрутизации не требует от конечных устройств SpW дополнительной логики, поэтому способен функционировать в сетях существующих устройств. Еще одним преимуществом такого подхода к организации сети является возможность горячего или холодного резервирования каналов с помощью задания различных маршрутов (виртуальных каналов) при составлении расписания или наборов расписаний под различные режимы работы системы. Взамен подобная схема требует обязательного наличия источника сообщений времени (Time-Code), а также реализации буферной памяти для каждого порта МК. В развитие данного протокола транспортного уровня возможно предложить выделение части пропускной способности сети для асинхронной передачи по сети информации с червячной маршрутизацией, нечувствительной к задержкам и потерям данных из-за коллизий.

Список литературы

1. *Бурдонов И.Б., Косачев А.С., Пономаренко В.Н.* Операционные системы реального времени. Москва: Институт системного программирования РАН, 2006. 49 с.
2. ECSS-E-ST-50-12C, SpaceWire — Links, nodes, routers and networks, ECSS Secretariat ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, Noordwijk, Netherlands, 31 July 2008 // European Cooperation for Space Standardization. <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-50-12c-spacewire-links-nodes-routers-and-networks/> (Дата обращения 08.10.2020).
3. ISO/IEC 7498-1:1994, Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model, ISO/IEC JTC1, June 1996, 59 p. // International Organization for Standardization. Publicly Available Standards. <https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html> (Дата обращения 08.10.2020).
4. *Журавлев В., Немытов А., Осипов Ю., Першин А.* SpaceWire: взгляд со стороны. Часть 1 // Современная электроника, 2017, № 8. С. 36–40. https://www.soel.ru/magazines/PRINT/SoEl_2017-8/SoEl2017-8pr.html (Дата обращения 08.10.2020).
5. Проект российского стандарта SpaceWire-Rus, совместимого с международным стандартом SpaceWire (SpaceWire-ECSS-E-ST-50-12C), СПбГУАП, 2012.
6. Wormhole Routing Techniques for Directly Connected Multicomputer Systems. Prasant Mohapatra, ACM Computing Surveys, vol. 30, № 3, september 1998. <https://www.cs.hmc.edu/~avani/wormhole/1998-p374-mohapatra.pdf> (Дата обращения 08.10.2020).