

**КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СТЕНДА
ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ SPACEWIRE
С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПРОГРАММНОГО
И АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ
ТОПОЛОГИИ БОРТОВОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

А.С. Максютин

ellis1998@yandex.ru

А.В. Мурыгин

avm514@mail.ru

СибГУ им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты разработки концепции стенда комплексного тестирования бортовой аппаратуры SpaceWire и структурная схема стенда с детальным описанием составных частей. Рассмотрен общий функционал стенда, разделенный на две основные части: автономное тестирование бортовой аппаратуры SpaceWire, обеспечиваемое составной частью — блоком автономного тестирования оконечного устройства, и тестирование информационного взаимодействия построенной топологии сети, обеспечиваемое блоками имитаторов коммутационной среды сети и имитаторов терминальных узлов сети. Под тестированием информационного взаимодействия построенной топологии сети подразумевается тестирование различных бортовых сетей космического аппарата. Подробно описан основной принцип, благодаря которому в стенде осуществляется информационное взаимодействие построенной топологии сети — аппаратное и программное моделирование. Рассмотрена основная особенность разработки, заключающаяся в возможности масштабирования составных частей стенда, что позволяет обеспечить реконфигурацию топологии сети в зависимости от решаемой задачи — построения конкретной модели бортовой сети космического аппарата. Приведены примеры возможной комплектации стенда с различным числом моделируемых узлов бортовой сети и коммутаторов, а также описание реализованной части стенда и практическое применение с аппаратурой SpaceWire

Ключевые слова

Стенды тестирования, методы тестирования, космические аппараты, бортовые сети, SpaceWire

Поступила 13.07.2022

Принята 13.02.2023

© Автор(ы), 2023

Введение. Во всех сферах человеческой деятельности широко распространены сетевые технологии. Однако внедрение таких технологий в космическом приборостроении затруднено, поскольку они не отвечают требованиям, предъявляемым к аппаратуре космических аппаратов (КА). Как правило, это касается таких параметров, как простота реализации, энергопотребление, надежность и др. [1]. Для отечественных КА внедрение мультиплексного канала информационного обмена на основе MIL-STD-1553В стало значимым шагом в развитии бортовых интерфейсов [2]. Выпущены две версии отечественных стандартов, которые до сих пор служат фундаментом для реализации бортовых интерфейсов КА. При этом сохранились потребности в увеличении скорости передачи и обработки информации, снижении энергопотребления, массы и стоимости космической техники, поэтому необходимо внедрение новых технологий передачи информации на основе достижений современной микроэлектроники.

Целенаправленную попытку изменить данную ситуацию предприняло Европейское космическое агентство (ESA) [3]. Европейской ассоциацией по стандартизации в области космической техники (ECSS) [4], работающей в рамках европейской космической программы, в 2003 г. была предложена первая версия технологии SpaceWire [5]. В 2008 г. принят стандарт технологии SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C.Rev.1¹, основанный на IEEE 1355², TIA/EIA-644³ и IEEE 1596.3⁴, действующий и в настоящее время.

Технология SpaceWire — это перспективная системообразующая технология для высокоскоростной коммуникации и комплексирования бортовых систем КА, которая может применяться и в распределенных системах различного назначения (промышленных, бортовых, наземных и др.) [6]. SpaceWire позволяет обеспечить высокие скорости передачи информации, малые задержки доставки сообщений, устойчивость к отказам

¹ ECSS-E-ST-50-12C.Rev.1. Space engineering. SpaceWire — Links, nodes, routers and networks. European cooperation for space standardization. Noordwijk, ESA Publications Division ESTEC, 2008.

² IEEE 1355. Heterogeneous Interconnect (HIC). Low-Cost, Low-Latency Scalable Serial Interconnect for Parallel System Construction. IEEE Standards Association, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1996.81004>

³ TIA/EIA-644. Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling (LVDS). Interface Circuits, Texas Instruments, 1996.

⁴ IEEE 1596.3. Standard for Low-Voltage Differential Signals for Scalable Coherent Interface. Cupertino, CA, Microprocessor Standards Committee, 1996.

и сбоям, низкое энергопотребление, электромагнитную совместимость, компактную реализацию в сверхбольших интегральных схемах [7], поддержку систем реального времени и системных функций бортовых комплексов [8]. В настоящее время SpaceWire отвечает всем требованиям эксплуатации в составе бортовых космических систем. Таким образом, она быстро получила распространение в зарубежной космической технике [9].

Тестирование бортовой сети SpaceWire. Создание системы управления современного КА требует решения большого комплекса вопросов, основным из которых является верификация и отработка системы. С этой целью одновременно с разработкой аппаратуры, алгоритмов и программного обеспечения создаются средства и методики, позволяющие достаточно полно и тщательно испытать и отработать комплекс управления КА [10].

В отечественной практике выявлены единичные случаи создания стендов и рабочих мест тестирования для бортовой аппаратуры (БА) SpaceWire. Стенды, базирующиеся на использовании зарубежного испытательного оборудования, не позволяют в полном объеме провести проверку БА на соответствие требованиям стандарта ECSS-E-ST-50-12C.Rev.1, а также требованиям, предъявляемым к бортовой сети КА.

Принято решение о начале разработки стенда для тестирования БА SpaceWire. При определении общей концепции стенда его функционал был разделен на две части:

- 1) автономное тестирование БА SpaceWire;
- 2) тестирование информационного взаимодействия построенной топологии сети.

В части автономного тестирования БА SpaceWire существует большое число специализированного испытательного оборудования, позволяющего в полной мере осуществить проверку соответствия тестируемого образца стандарту ECSS-E-ST-50-12C.Rev.1. Созданием такого оборудования занимается главным образом компания Star-Dundee (Великобритания), предоставляя широкую линейку тестеров [11], часть которых используется в разрабатываемом стенде. Блок автономного тестирования имеет ряд особенностей, например, тестируемые образцы проверяются на соответствие требованиям протоколов RMAP (протокол удаленного действия к памяти) и СТП-ИСС (сетевой транспортный протокол, разработанный ОАО «ИСС», г. Железнодорожск). Под тестированием информационного взаимодействия построенной топологии сети подразумевается тестирование различных бортовых сетей КА для определения сети с оптимальными параметрами производительности, т. е. предполагается моделирование информационного взаимодействия бортовой сети КА.

Основными разновидностями процесса моделирования можно считать аппаратное (натурное) и программное моделирование. При аппаратном моделировании исследуемая система заменяется соответствующей, но другой материальной системой, которая воспроизводит свойства изучаемой системы с сохранением их физической природы. Однако возможности аппаратного моделирования имеют границы. Аппаратное моделирование позволяет решать отдельные задачи при небольшом числе сочетаний исследуемых параметров системы. При этом практически невозможно проверить работу вычислительной сети для вариантов с использованием различных типов коммуникационных устройств — маршрутизаторов, коммутаторов и др. Проверка на практике десяти разных типов маршрутизаторов связана не только с большими усилиями и временными затратами, но и с немалыми материальными затратами.

Во многих случаях оптимизации сети предпочтительным оказывается использование программного моделирования. Программная модель представляет собой совокупность соотношений, определяющих процесс изменения состояния системы в зависимости от ее параметров, входных сигналов, начальных условий и времени. Особым классом программных моделей являются имитационные модели, которые шаг за шагом воспроизводят события, происходящие в реальной системе. Имитационные модели вычислительных сетей воспроизводят процессы генерации сообщений, разбиения их на пакеты, кадры определенных протоколов, процессы задержки, связанные с обработкой сообщений, пакетов и кадров, а также процессы их обработки маршрутизатором и др.

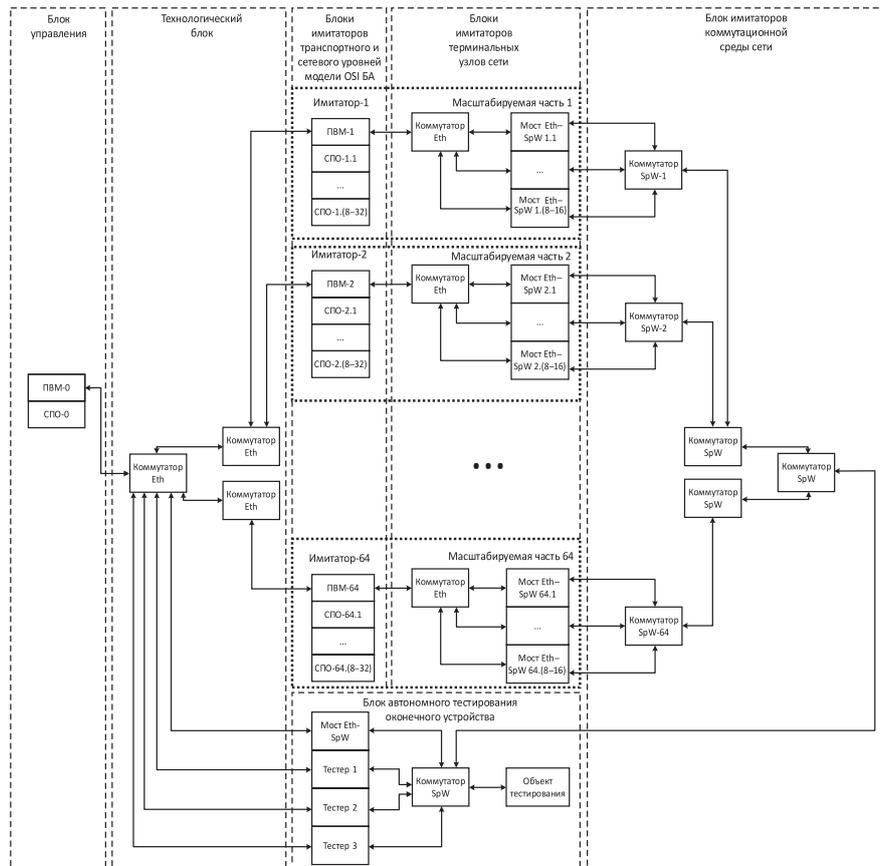
При этом не требуется приобретать дорогостоящее оборудование, поскольку его работа имитируется программами, достаточно точно воспроизводящими основные особенности и параметры такого оборудования [12].

Состав стенда тестирования. Структурная схема стенда комплексного тестирования БА SpaceWire с возможностью аппаратного и программного моделирования реконфигурируемой топологии бортовой сети КА приведена на рисунке.

Стенд тестирования состоит из следующих основных функциональных модулей:

- блока управления, содержащего персональную вычислительную машину (ПВМ-0) с разрабатываемым специальным программным обеспечением (СПО-0);
- технологического блока, состоящего из коммутаторов Ethernet (Eth), число которых определяется комплектацией стенда (подключение коммутаторов реализуется согласно структурной схеме);

- блоков имитаторов транспортного и сетевого уровней модели OSI (Open Systems Interconnection) БА, содержащих ПВМ, с реализуемыми в них блоками СПО; число ПВМ определяется комплектацией стенда, а число СПО для каждой ПВМ — комплектацией стенда;
- блоков имитаторов терминальных узлов сети БА (число блоков соответствует числу имитаторов транспортного и сетевого уровней модели OSI БА); каждый имитатор состоит из коммутатора Eth и интерфейсных мостов Ethernet-SpaceWire (Eth-SpW), число которых определяется комплектацией стенда;
- блока автономного тестирования оконечного устройства, содержащего интерфейсный мост Eth-SpW, три тестера и коммутатор SpaceWire (SpW);
- блока имитаторов коммутационной среды сети, содержащего коммутаторы SpW; число коммутаторов определяется комплектацией стенда, их подключение может быть осуществлено в зависимости от требуемой топологии реализуемой сети.



Структурная схема стенда тестирования БА SpaceWire

В схеме стенда (см. рисунок) выделена масштабируемая часть, состоящая из отдельных частей блоков имитаторов транспортного и сетевого уровней модели OSI БА, имитаторов терминальных узлов сети. В зависимости от сложности топологии сети число частей блоков имитаторов может изменяться от 1 до 64. При максимальной комплектации блоков имитаторов (64 части) и максимальном числе блоков СПО в каждом имитаторе транспортного и сетевого уровней модели OSI БА стенд позволяет имитировать информационное взаимодействие в сети 1024 узлов абонентов с возможностью резервирования.

В зависимости от комплектации стенда ему присваивается шифр X1.X2.X3, где X1 — число узлов абонентов (8–1024); X2 — число сетевых коммутаторов SpW (1–137); X3 — тип резервирования для всех узлов абонентов (1 — резервирование отсутствует, 2 — резервирование реализуется).

В качестве примера в таблице приведены возможные варианты комплектации стенда.

Варианты комплектации стенда

Шифр X1.X2.X3	Число оборудования в блоке					
	технологическом	имитаторе транспортного и сетевого уровней модели OSI БА		имитаторе терминальных узлов сети		имитаторе коммутационной среды сети
		Коммутаторы Eth	ПВМ	СПО	Коммутаторы Eth	
1024.137.2	5	64	2048	64	1024	137
512.35.2	3	32	1024	32	512	35
256.17.2	1	16	512	16	256	17
8.1.1	1	1	8	1	8	1

Назначение стенда тестирования. Стенд комплексного тестирования БА SpaceWire с возможностью аппаратного и программного моделирования реконфигурируемой топологии бортовой сети КА должен обеспечить следующие виды проверок.

1. Автономное тестирование БА SpaceWire, которое выполняется составной частью стенда — блоком автономного тестирования оконечного устройства, реализует перечисленные ниже функции (по стандарту ECSS-E-ST-50-12C.Rev.1).

1.1. Проверка реакции тестируемого узла на ошибку бита контроля четности на символьном уровне.

1.2. Проверка корректности прохождения машиной состояний тестируемого узла на уровне обмена.

1.3. Проверка реакции тестируемого узла на ошибку кредитования тестируемого узла на уровне обмена.

1.4. Проверка поддержки путевой, логической, адаптивной групповой маршрутизации коммутаторами SpW на сетевом уровне [13].

1.5. Проверка способности корректной работы коммутатора SpW при высокой загрузке коммутационной матрицы на сетевом уровне.

1.6. Проверка корректности работы коммутатора SpW при переполнении приемного буфера матрицы на сетевом уровне.

1.7. Проверка поддержки мульти- и широковещательной передачи информации коммутаторами SpW на сетевом уровне. Проверка на транспортном уровне модели OSI поддержки узлов механизмов протокола RMAP ECSS-E-ST-50-52C.Rev.1 [14] (т. е. механизмов отправки и приема команд записи, чтения и команды RMW (read-modify-write); корректности отработки команд с ошибками в соответствии со статусом) и спецификации СТП-ИСС-13 [15] (т. е. механизмов отправки и приема команды управления, срочного и обычного сообщений; корректности работы таймера времени жизни пакета и повторной его отправки).

2. Тестирование, обеспечиваемое блоками имитатора коммутационной среды сети и имитаторами терминальных узлов сети, следующих параметров информационного взаимодействия построенной топологии сети.

2.1. Пропускной способности построенной топологии сети.

2.2. Задержки каналов связи при передаче информационных пакетов и команд управления.

2.3. Вероятности доставки информационного пакета или команды управления узлу назначения без искажений.

Результаты разработки. Для автономного тестирования БА SpaceWire разработаны и программно реализованы тесты, приведенные в пунктах 1.1–1.7. Данные тесты могут быть запущены с управляющей ПВМ-0 посредством СПО-0 в автоматическом и пошаговом режимах. Отработка тестов проводилась на коммутаторе SpW, который успешно прошел тестирование, подтвердив требования большинства пунктов соответствующих стандартов.

В части тестирования информационного взаимодействия построенной топологии сети реализована минимальная комплектация стенда

(см. таблицу). Программно реализованы простейшие имитаторы, которые осуществляют информационное взаимодействие бортовой сети КА. Реализация данных имитаторов позволяет выполнять дальнейшее масштабирование сети в различных вариациях и рассчитать параметры, приведенные в пунктах 2.1–2.3 для выбора оптимальной топологии.

Заключение. Разработка стенда для тестирования БА SpaceWire способствует в значительной степени расширению возможностей испытательной базы бортовых сетей на основе данной технологии. В дальнейшем планируются разработка и программная реализация алгоритмов тестирования для завершения работы над согласованным объемом проверок автономного тестирования БА SpaceWire, а также расширение функционала стенда в части тестирования информационного взаимодействия бортовой сети SpaceWire в виде исследования новых характеристик сети таких, как надежность, управляемость и др.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ханов В.Х. Сетевые технологии для бортовых систем космического аппарата: опыт разработки. *Доклады ТУСУР*, 2014, № 2, с. 287–293.
- [2] Начальные сведения о МКИО. *support.milandr.ru: веб-сайт*. URL: https://support.milandr.ru/base/primenenie/programmirovanie-32-razryadnykh-mk/rabota_s_mkio_mil_std_1553_ili_gost_52070_2003/48398 (дата обращения: 02.04.2022).
- [3] Европейское космическое агентство. *esa.int: веб-сайт*. URL: <https://www.esa.int> (дата обращения: 03.04.2022).
- [4] Европейская кооперация по стандартизации в области космической техники. *ecss.nl: веб-сайт*. URL: <https://www.ecss.nl> (дата обращения: 04.04.2022).
- [5] Горбунов С.Ф., Гришин В.Ю., Еремеев П.М. Сетевые интерфейсы космических аппаратов: перспективы развития и проблемы внедрения. *Наноиндустрия*, 2019, спец. выпуск, с. 128–130.
- [6] Коммуникационная технология SpaceWire. *elvees.ru: веб-сайт*. URL: <https://elvees.ru/home/index.php?id=555> (дата обращения: 10.04.2022).
- [7] Чепрасова А.С., Мамелин Ю.В. Будущее и настоящее СБИС. *Молодой ученый*, 2016, № 17, с. 79–81.
- [8] Солохина Т.В., Петричкович Я.Я., Шейнин Ю.Е. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2007, № 1, с. 38–49.
- [9] Дымов Д.В., Двирный В.В., Еременко Н.В. Перспективы применения сетевой технологии SpaceWire на российских спутниках. *Решетневские чтения*, 2015, т. 1, № 19, с. 103–105.

[10] Голубев Е.Н., Николаев А.О. Развитие и совершенствование методики стендовых испытаний бортового комплекса управления космического аппарата. *Вестник СибГАУ*, 2013, № 2, с. 128–132.

[11] Компания Star-Dundee. *star-dundee.com: веб-сайт*.
URL: <https://www.star-dundee.com> (дата обращения: 15.04.2022).

[12] Имитационное моделирование компьютерных сетей. *educationspb.ru: веб-сайт*.
URL: <http://www.educationspb.ru/komp/37520.html> (дата обращения: 15.04.2022).

[13] Калимолдаев М.Н., Тулемисова Г.Е. Алгоритм адаптивной маршрутизации информационного потока сетей интегрального обслуживания. *Новости науки Казахстана*, 2013, № 2, с. 38–50.

[14] Remote memory access protocol (normative).
URL: <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWireRMAPProtocolDraftF4thDec2006.pdf> (дата обращения: 20.04.2022).

[15] Шейнин Ю.Е., Оленев В.Л., Лавровская И.Я. и др. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire. *Исследования Наукограда*, 2016, № 1-2, с. 21–30.

Максютин Андрей Сергеевич — соискатель кафедры информационно-управляющих систем СибГУ им. М.Ф. Решетнева (Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, пр-т имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31).

Мурыгин Александр Владимирович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем СибГУ им. М.Ф. Решетнева (Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, пр-т имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Максютин А.С., Мурыгин А.В. Концепция построения стенда для тестирования бортовой аппаратуры SpaceWire с возможностью программного и аппаратного моделирования реконфигурируемой топологии бортовой сети космического аппарата. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 2 (145), с. 4–14. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-4-14>

**THE CONCEPT OF CONSTRUCTING A STAND TO TEST
THE SPACEWIRE ONBOARD EQUIPMENT WITH POSSIBILITY
OF SOFTWARE AND HARDWARE SIMULATION
OF RECONFIGURABLE TOPOLOGY
OF THE SPACECRAFT ONBOARD NETWORK**

A.S. Maksyutin

ellis1998@yandex.ru

A.V. Murygin

avm514@mail.ru

Reshetnev University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract

The paper presents results of developing a concept of the stand for complex testing of the SpaceWire onboard equipment and its block diagram with detailed description of the components. General stand functionality is described. It is divided into two main groups: autonomous testing of the SpaceWire onboard equipment provided by the stand component, i.e., the terminal device autonomous testing unit, and testing of the information interaction of the constructed network topology provided by the network switching environment simulator units and the network terminal units simulators. The basic principle is described in detail, due to which information in the constructed network topology is interacting in hardware and software simulation on the stand. The main development feature is considered consisting in the possibility of scaling the stand components and making it possible to reconfigure the network topology depending on the task to solve — constructing a specific model of the spacecraft onboard network. Examples of the stand possible configuration are provided with different number of the simulated onboard network nodes and switches, as well as description of the implemented stand part and practical application with the SpaceWire equipment

Keywords

Test stands, test methods, spacecraft, onboard networks, SpaceWire

Received 13.07.2022

Accepted 13.02.2023

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Khanov V.Kh. Network technologies for on-board systems spacecraft: development experience. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2014, no. 2, pp. 287–293 (in Russ.).
- [2] Nachalnye svedeniya o MKIO [Initial information about multiplex data-exchange channel]. *support.milandr.ru: website* (in Russ.). Available at: https://support.milandr.ru/base/primenenie/programmirovaniye-32-razryadnykh-mk/rabota_s_mkio_mil_std_1553_ili_gost_52070_2003/48398 (accessed: 02.04.2022).
- [3] European Space Agency. *esa.int: website*. Available at: <https://www.esa.int> (accessed: 03.04.2022).
- [4] European Cooperation for Space Standardization. *ecss.nl: website*. Available at: <https://www.ecss.nl> (accessed: 04.04.2022).
- [5] Gorbunov S.F., Grishin V.Yu., Ereemeev P.M. Spacecraft network interfaces: development prospects and implementation problems. *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2019, spec. iss., pp. 128–130 (in Russ.).

- [6] Kommunikatsionnaya tekhnologiya SpaceWire [SpaceWire communication technology]. *elvees.ru: website* (in Russ.). Available at: <https://elvees.ru/home/index.php?id=555> (accessed: 10.04.2022).
- [7] Cheprasova A.S., Mamelin Yu.V. The future and the present of VLSI. *Molodoy uchenyi* [Young Scientist], 2016, no. 17, pp. 79–81 (in Russ.).
- [8] Solokhina T., Petrichkovich Ya., Sheynin Yu. SpiceWire technology for parallel systems and on-board distributed systems. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2007, no. 1, pp. 38–49 (in Russ.).
- [9] Dymov D.V., Dvirnyy V.V., Eremenko N.V. Prospects for SpaceWire network implementation in Russian spacecraft. *Reshetnevskie chteniya*, 2015, vol. 1, no. 19, pp. 103–105 (in Russ.).
- [10] Golubev E.N., Nikolaev A.O. Differential correction of position measurement errors in event of geomagnetic disturbances. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2, pp. 128–132 (in Russ.).
- [11] Star-Dundee Company. *star-dundee.com: website*. Available at: <https://www.star-dundee.com> (accessed: 15.04.2022).
- [12] Imitatsionnoe modelirovanie kompyuternykh setey [Imitation modelling of computer networks]. *educationspb.ru: website* (in Russ.). Available at: <http://www.educationspb.ru/komp/37520.html> (accessed: 15.04.2022).
- [13] Kalimoldaev M.N., Tulemisova G.E. Algorithm of information flow adaptive routing in integrated service networks. *Novosti nauki Kazakhstana*, 2013, no. 2, pp. 38–50 (in Russ.).
- [14] Remote memory access protocol (normative). Available at: <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWireRMAPPProtocolDraftF4thDec2006.pdf> (accessed: 20.04.2022).
- [15] Sheynin Yu.E., Olenev V.L., Lavrovskaya I.Ya., et al. Development, analysis and modeling of STP-ISS transport protocol for spacewire onboard networks. *Issledovaniya Nauko-grada*, 2016, no. 1-2, pp. 21–30 (in Russ.).

Maksyutin A.S. — Applicant, Department of Information and Control Systems, Reshetnev University (Imeni gazety Krasnoyarskiy rabochiy prospekt 31, Krasnoyarsk, 660037 Russian Federation).

Murygin A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Information and Management Systems, Reshetnev University (Imeni gazety Krasnoyarskiy rabochiy prospekt 31, Krasnoyarsk, 660037 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Maksyutin A.S., Murygin A.V. The concept of constructing a stand to test the SpaceWire onboard equipment with possibility of software and hardware simulation of reconfigurable topology of the spacecraft onboard network. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 2 (145), pp. 4–14 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-4-14>