

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОТОКОЛАМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПО МАГИСТРАЛЬНОМУ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМУ ИНТЕРФЕЙСУ

А.Ю. Трещёткин

alexander.treschetkin@yandex.ru

Н.Г. Гамзатов

narimanzzz@mail.ru

С.А. Нахаев

nsa@se.zgrad.ru

Н.В. Краснова

krasnova2203@rambler.ru

АО «НИИ «Субмикрон», Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация

Проанализированы результаты разбора нештатных ситуаций, возникающих при передаче информации по магистральному последовательному интерфейсу при летно-конструкторских испытаниях ряда современных космических аппаратов. Предложены общие требования к протоколам взаимодействия. Выявлено, что к нештатным ситуациям приводит отсутствие в бортовых вычислительных системах следующих функций: установки признака «Абонент занят», проверки командного слова на допустимость, работы с командами управления «Передать ответное слово», «Установить оконечное устройство в исходное состояние», с контрольными суммами, сбором и накоплением диагностической информации, локализацией места отказа. Рассмотрены неисправности, возникающие при взаимодействии бортовых вычислительных систем и центрального бортового компьютера по магистральному последовательному интерфейсу, описаны их проявления. Приведен перечень сообщений взаимодействия по магистральному последовательному интерфейсу, необходимых для локализации и устранения неисправностей. Определены требования по сбору и накоплению диагностической информации, взаимодействию центрального бортового компьютера с вычислительными системами бортового комплекса управления. Отмечено, что при контроле на заводах-изготовителях бортовых вычислительных систем необходима проверка устойчивости на пороговых значе-

Ключевые слова

Бортовая вычислительная система, бортовой комплекс управления, магистральный последовательный интерфейс, нештатная ситуация, сетевой интерфейс, устройство интерфейса, центральный бортовой компьютер

ниях сигналов и взаимодействия бортовых вычислительных систем и центрального бортового компьютера при наличии неблагоприятных факторов (сбоев и отказов), возникающих при работе по магистральному последовательному интерфейсу

Поступила 20.01.2025

Принята 14.05.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. Управление космическим аппаратом (КА) осуществляется автоматически через бортовой комплекс управления (БКУ). В настоящее время БКУ разрабатываются на базе сетевых вычислительных бортовых систем (БС) [1–4]. Связь блоков БС между собой в составе БКУ осуществляется по сетевому (шинному) интерфейсу (СИ) [5]. Выполнение требований протоколов взаимодействия является актуальной задачей, поэтому БКУ подвергаются испытаниям [6–8], а число и качество испытаний учитывается при расчете надежности [9–11]. В состав БКУ входят: центральный бортовой компьютер (ЦБК) с программно-аппаратным механизмом определения и парирования неисправностей (как правило, трехкратно резервированный); БС управления движением и навигацией, бортовой аппаратурой; БС измерений; СИ. Приведем критерии сравнения СИ [12, 13], используемых в БКУ:

- магистральный принцип обмена;
- достоверность передачи информации;
- минимизация связей и массы;
- высокая помехозащищенность и гальваническая развязка;
- возможность резервирования;
- высокая степень отработки;
- наличие элементной базы;
- стандартный, унифицированный интерфейс ввода/вывода.

Соответствовать указанным критериям можно при использовании магистрального последовательного интерфейса (МПИ) ГОСТ Р 52070–2003¹.

Основными особенностями МПИ являются:

- магистральный принцип построения;
- командно-ответный принцип обмена информацией;
- число абонентов 32 (включая контроллер);
- длина магистрали, выполненной в виде экранированной витой пары проводов, не менее 100 м;
- использование способа кодирования информации «Манчестер-2»;

¹ ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. М., ИТК Изд-во стандартов, 2003.

– регламентация форматов обмена, содержимого служебных слов и логики управления каналами.

Магистральный последовательный интерфейс является универсальным средством сопряжения аппаратуры служебных целевых систем. Для него разработаны единые требования по электрическому и логическому сопряжениям, а также управлению каналами резервирования. Например, в [14] приведено сравнение интерфейсных модулей МПИ по размеру и напряжению питания, тогда как основным аспектом должно быть сбое- и отказоустойчивое функционирование программно-аппаратной реализации, подтверждаемое правильными электрическим и логическим сопряжениями. Моделирование и испытания на моделях [15–17] не предполагают отработки нештатной ситуации (НС). Методики наземной экспериментальной отработки БКУ [18–20] не содержат методов отработки НС. Поэтому отработка НС при наземных экспериментах является актуальной задачей, требующей дополнительных исследований.

Результаты разбора НС. При разборе НС, возникших при летно-конструкторских испытаниях и проведении дополнительных испытаний, выявлены следующие моменты.

Некоторые абоненты БКУ при взаимодействии по МПИ не используют в ответном слове (ОС) признак «Абонент занят», предназначенный для согласования вычислительных процессов между устройствами путем закрытия доступа к абоненту на время выполнения задач, которые нельзя прерывать.

В отдельных абонентах отсутствует проверка поступившего командного слова на допустимость и не реализованы команды управления (КУ) «Передать ОС», «Установить оконечное устройство (ОУ) в исходное состояние»; КУ обязательны для реализации (ГОСТ Р 52070–2003). Они могут быть использованы для локализации выявляемых неисправностей по типу и месту возникновения.

Отсутствует контроль принимаемой информации, не используется контрольное суммирование передаваемой информации. Таким образом, возможный сбой при формировании данных в аппаратуре при передаче и приеме информации по интерфейсу не будет обнаружен системой.

В результате анализа протоколов взаимодействия по МПИ в БС БКУ выявлено, что формируемая диагностическая информация недостаточно полная для возможности воспроизведения на наземном испытательном комплексе полетных ситуаций. Разбор НС на ряде последних КА показал, что полученная диагностическая информация не дает возможности сделать достоверный вывод о причине возникновения НС.

Система не проводит локализацию места отказа, обнаруженного при обмене информацией с абонентом. При обнаружении отказа система повторяла обмен с абонентом по резервной линии, что приводило к НС исполнительной и измерительной системы КА.

Требование по отработке НС. Под НС в МПИ понимаются неисправности (сбои/отказы), возникающие при взаимодействии ЦБК с БС и приводящие к неспособности выполнить обмен. При обнаружении неисправности ЦБК, используя предусмотренные в протоколах обмена БС сообщения, локализует неисправности по месту и типу (сбой/отказ); исправляет их путем повтора или подключения резерва; формирует диагностическую информацию; продолжает штатно функционировать.

Предложения по общим требованиям к протоколам взаимодействия по МПИ вытекают из необходимости решения следующих задач:

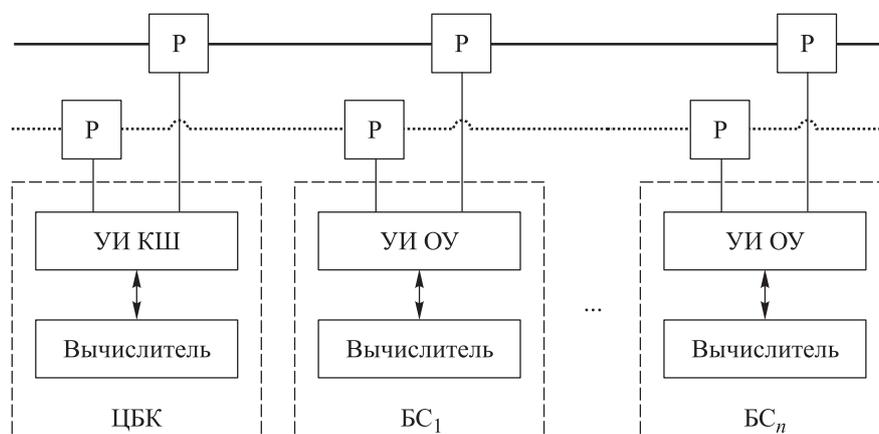
- взаимодействие ЦБК с БС в условиях реального времени и многозадачности процессов;
- отработка НС, возникшей на МПИ при взаимодействии ЦБК с БС.

Магистральный последовательный интерфейс — совокупность программно-аппаратных средств и правил, обеспечивающих обмен информацией между ЦБК и БС последовательным кодом по общей информационной магистрали (ИМ). Упрощенная структура МПИ БКУ приведена на рисунке. В состав МПИ входят следующие технические и программные компоненты:

- основная и резервная ИМ — физические линии передачи информации, обеспечивающие связь устройств интерфейса, состоящих из последовательно соединенных через разветвители отрезков кабелей и двух согласующих шину резисторов;
- разветвитель (Р) — согласующее устройство, необходимое для подключения к МПИ;
- устройство интерфейса (УИ) — модуль, функционирующий в режиме ОУ в составе БС и в режиме контроллера шины (КШ) в составе ЦБК;
- вычислители — программно-аппаратные средства, выполняющие целевую задачу;
- драйвер — программные средства вычислителей, обеспечивающие прием и передачу информации между ЦБК и БС.

Требования по взаимодействию ЦБК с БС БКУ. Для взаимодействия ЦБК с БС в условиях реального времени и многозадачности процессов необходимо использовать в ОС, формируемом БС в ответ на поступление команды от ЦБК, признак «Абонент занят» (разряд 3 в 16-разрядном ма-

шинном слове), который должен указывать на возможность приема и отработки команды БС в данный момент времени.



Упрощенная структура МПИ БКУ

Признак «Абонент занят» устанавливается и сбрасывается БС в следующих случаях:

- прием сообщения по формату 1 и сброс после выполнения задания по данному сообщению;
- подготовка информации для передачи по формату 2 и сброс после подготовки информации;
- БС находится в состоянии, при котором обработка сообщения может повлиять на функционирование, например, выполняется задача, которую нельзя прерывать.

При использовании БС признаков в ОС «неисправность абонента», «неисправность ОУ» в руководстве по эксплуатации БС должны быть описаны причины установки указанных признаков, состояние БС, при котором устанавливаются эти признаки, и алгоритм для продолжения взаимодействия с данной БС. При приеме БС недостоверной информации ОС не передается и принятое сообщение рассматривается как недостоверное.

Для надежной передачи данных обмена необходимо сопровождать контрольными суммами, подсчитанными циклическим суммированием 16-разрядных слов без учета переполнения, и передавать в последнем слове массива данных.

Сообщения, передаваемые по ИМ, должны иметь форматы 1, 2, 4, 5 (ГОСТ Р 52070–2003). Перечень обязательных сообщений приведен в табл. 1. Неисправности, которые могут возникнуть при взаимодействии ЦБК с БС по МПИ, и описание их проявлений приведены в табл. 2.

Таблица 1

Перечень обязательных сообщений

Назначение сообщения	Подадрес	Число слов	Данные	Примечание
<i>Формат 1</i>				
Передача тестовой информации	30	1–32	Произвольные	Используется при наработке на отказ электронных элементов в интерфейсе при стендовых испытаниях
Запрос на передачу протокола мониторинга	29	1	Номер блока из протокола	Протокол состоит из блоков по 31 слову
<i>Формат 2</i>				
Прием тестовой информации	30	1–32	Ранее переданные данные	
Прием протокола мониторинга принятых сообщений	29	31	Сообщения, принимаемые при функционировании	Массив, состоящий из ранее принятых сообщений
<i>Формат 4</i>				
Передать ОС	31	2		п. 4.4.2.3 ГОСТ Р 52070–2003 (используется при идентификации сбоя/отказа)
Установить в исходное состояние	31	8		п. 4.4.2.9 ГОСТ Р 52070–2003
<i>Формат 5</i>				
Передать последнюю команду	31	18	Последняя принятая команда	п. 4.4.2.12 ГОСТ Р 52070–2003

Таблица 2

Неисправности при передаче информации по МПИ

Состояние ЦБК	Возможные причины	Состояние БС
В ЦБК не поступило ответное слово от БС	Сбой/отказ передатчика ЦБК	Сообщение от ЦБК не поступило в УИ ОУ. Принята недостоверная информация; БС в ОС устанавливает разряд 9, но ОС не передается
	Сбой/отказ ИМ	
	Сбой/отказ приемника БС	
	Сбой/отказ передатчика БС	Сообщение от ЦБК поступило в БС; БС приступила к выполнению или выполнила принятое сообщение
	Сбой/отказ приемника ЦБК	
В ЦБК поступило ответное слово от БС с признаком «ошибка в сообщении» разряд 9	Сбой/отказ передатчика, ИМ, приемника БС	Сообщение от ЦБК не поступило в БС
Ответное слово от БС с признаком «ошибка в сообщении» разряд 9 (для БС, имеющих средства контроля на недопустимую команду)	В сообщении принята недопустимая команда	Команда от ЦБК в БС не выполняется
		Вычислительная БС находится в состоянии выполнения важной задачи. Для каждого абонента время нахождения в состоянии занятости индивидуально и определяется разработчиком абонента
В ЦБК поступило ответное слово от абонента с признаком «абонент занят»	В данный момент времени БС установила запрет обмена данными	Сообщение от ЦБК не поступило в БС
В ЦБК поступило ответное слово от абонента с признаком «запрос на обслуживание»	БС сообщает ЦБК о важном событии	В БС сформирована информация, которая может/должна использоваться в ЦБК; используется индивидуально каждой БС

Окончание табл. 2

Состояние ЦБК	Возможные причины	Состояние БС
<p>В ЦБК поступило ответное слово от абонента с признаками: «неисправность абонента», «неисправность ОУ»</p>	<p>Признаки устанавливаются БС; при использовании данных признаков в БС должно быть описание ее состояния, причины остановки признаков и должны быть даны рекомендации по дальнейшему взаимодействию с данной БС</p>	<p>Для предотвращения аварийных ситуаций исполнительные и измерительные системы, с которыми взаимодействует абонент, должны быть приведены в безопасное состояние</p>

С учетом реализации УИ в БС необходимо установить и согласовать с разработчиками программного обеспечения ЦБК правила переключения на резервную магистраль и отработки сообщений с недопустимыми командами. Бортовая вычислительная система должна формировать протокол мониторинга принятых от ЦБК сообщений, ЦБК — протокол мониторинга переданных сообщений для каждого БС.

При контроле на заводах-изготовителях БС необходимо:

– проверять устойчивость БС на пороговых значениях сигналов; БС должна обеспечивать прием/передачу достоверных слов не более одного ошибочного слова из 10^7 всех слов, принятых/переданных при взаимодействии на пороговых значениях сигналов;

– проверять взаимодействие БС и ЦБК при наличии неблагоприятных факторов (сбоев и отказов), возникающих в мультиплексном канале информационного обмена).

Заключение. Учитывая результаты разбора НС, возникающих при летно-конструкторских испытаниях, и принимая во внимание то, что большинство аппаратно-программных средств используются также и в других КА, можно сделать вывод о необходимости выработки и соблюдения единых формализованных требований при разработке протоколов взаимодействия при передаче информации по МПИ (ГОСТ Р 52070–2003) БКУ с точки зрения обеспечения отказоустойчивости КА.

В настоящее время при отсутствии формализованных требований по разработке протоколов взаимодействия при передаче информации по МПИ (ГОСТ Р 52070–2003) для решения задачи обеспечения отказоустойчивости КА предлагается при проектировании БКУ в техническом задании на БС ввести требования на протоколы взаимодействия по МПИ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пучков А.В., Максютин А.С., Гринберг Г.М. Разработка симулятора для тестирования систем управления электродвигателями космических аппаратов. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. Т. 1. Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2022, с. 652–654. EDN: TBQVDG
- [2] Зюзев А.М., Мудров М.В., Нестеров К.Е. Аппаратно-программные симуляторы электротехнических комплексов. *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*, 2016, № 2, с. 58–62. DOI: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2016-2-58-62>
- [3] Некрасов В.В., Дементьев Д.Ю., Папенькин С.В. и др. Методика проектирования микроконтроллерной системы управления скоростью вращения ротора двигателя-маховика для высокодинамичных космических аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 2023, № 3, с. 101–118. DOI: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-3-8>

- [4] Жарков В.И., Петров М.Н., Ризов И.Т. Разработка оконечного устройства для мультиплексного канала обмена данных на ПЛИС. *Вестник НовГУ*, 2020, № 2, с. 16–19. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2\(118\).16-19](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2(118).16-19)
- [5] Решетько В.М., Заева М.А., Урих А.С. и др. Модернизация функционала канала связи в условиях невозможности смены физической реализации среды обмена данными бортовой системы. *Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы»*, 2019, с. 85–89. EDN: JYDNZH
- [6] Быков А.П., Пиганов М.Н. Методика автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов. *Труды МАИ*, 2020, № 111. DOI: <https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-7>
- [7] Букирёв А.С. Способ диагностирования комплекса бортового оборудования воздушных судов на основе машинного обучения. *Труды МАИ*, 2023, № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177672>
- [8] Савкин Л.В. Бортовая реконфигурируемая система встроенного контроля и диагностики космического аппарата. Патент РФ 2604438. Заявл. 22.07.2015, опубл. 10.12.2016.
- [9] Быков А.П. Модель и метод оценки надежности бортовых радиоэлектронных устройств. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*, 2021, № 1, с. 17–23.
- [10] Фролов А.А. Выбор структурной схемы надежности бортового комплекса управления космического аппарата дистанционного зондирования Земли. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2015, т. 146, № 3, с. 30–37. EDN: VTILSH
- [11] Ковель А.А., Горностаев А.И. Этапы информационного обеспечения разработок бортовой аппаратуры космических аппаратов. *Космические аппараты и технологии*, 2021, т. 5, № 3, с. 166–176. DOI: <https://doi.org/10.26732/j.st.2021.3.06>
- [12] Горбунов С.Ф., Гришин В.Ю., Еремеев П.М. Сетевые интерфейсы космических аппаратов: перспективы развития и проблемы внедрения. *Наноиндустрия*, 2019, № 89, с. 128–130. EDN: ZHEXCP
- [13] Аюкаева Д.М., Воронин Ф.А., Полуаршинов М.А. и др. Интеграция управляемой научной аппаратуры на борт российского сегмента международной космической станции. *Космическая техника и технологии*, 2020, № 30, с. 66–75. DOI: <https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-66-75>
- [14] Щербакова С.А., Игнатовский В.В., Филонова С.Ю. Модуль мультиплексного канала информационного обмена. *Вестник СибГАУ*, 2015, т. 16, № 1, с. 214–223. EDN: TRIVDB
- [15] Дегтярь В.Г., Соловенко А.И., Акишев А.А. Стенд физико-математического моделирования для наземной экспериментальной отработки комплексов систем управления. *Ракетно-космическая техника*, 2019, т. 1, с. 39–44. EDN: QFYGFR
- [16] Комаров В.А., Сарафанов А.В. Повышение качества наземной экспериментальной отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем управления

космических аппаратов. *Надежность и качество сложных систем*, 2022, № 3, с. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2022-3-8>

[17] Акишев А.А. Построение математической модели летательного аппарата для наземной экспериментальной отработки систем управления РКТ. *Наука XXI века: проблемы, поиски, решения*. Миасс, Геотур, 2020, с. 15–21. EDN: OXTKMB

[18] Гранкина О.О. Проектирование, изготовление и испытания бортового комплекса управления космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли. *Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование*. Донецк, ДонНТУ, 2021, с. 123–127. EDN: HETKTC

[19] Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Вогоровский Р.В. и др. Автоматизация испытаний параметров и логики функционирования командно-измерительной системы. *Исследования наукограда*, 2016, № 3-4, с. 17–24. EDN: XEJSSR

[20] Кудряшова Г.В., Бабанов Д.А., Галимзянов А.Т. Применение метода нагрузочного тестирования при наземной экспериментальной отработке блоков управления систем наведения антенн. *Вестник СибГАУ*, 2016, т. 17, № 2, с. 402–407. EDN: XAYZCZ

Трещёткин Александр Юрьевич — аспирант, начальник лаборатории прототипирования перспективных изделий АО «НИИ «Субмикрон» (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, д. 5, стр. 2).

Гамзатов Нариман Гамзевич — начальник лаборатории применения элементной базы АО «НИИ «Субмикрон» (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, д. 5, стр. 2).

Нахаев Станислав Александрович — главный специалист-программист АО «НИИ «Субмикрон» (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, д. 5, стр. 2).

Краснова Наталья Вениаминовна — ведущий инженер-программист АО «НИИ «Субмикрон» (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, д. 5, стр. 2).

Про́сьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Трещёткин А.Ю., Гамзатов Н.Г., Нахаев С.А. и др. Общие требования к протоколам взаимодействия по магистральному последовательному интерфейсу. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 3 (152), с. 49–63. EDN: MYUPCS

GENERAL REQUIREMENTS FOR THE TRUNK SERIAL INTERFACE COMMUNICATION PROTOCOLS

A.Yu. Treshchetkin

alexander.treschetkin@yandex.ru

N.G. Gamzatov

narimanzzz@mail.ru

S.A. Nakhaev

nsa@se.zgrad.ru

N.V. Krasnova

krasnova2203@rambler.ru

JSC “Research Institute “Submicron”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract

The paper presents results of analyzing abnormal situations that appear in data transmission via the trunk serial interface during the flight design testing on a number of spacecraft developed at present, and proposes also general requirements for the interaction protocols. It shows that abnormal situations could be caused by the absence in the onboard computer systems of the following functions: setting the “Subscriber is busy” identifier, checking the command word for admissibility, working with the control commands “Transmit the response word”, “Set the terminal device to the initial state”, verifying checksums, collection and accumulation of the diagnostic data, and localizing the failure position. The paper considers failures arising in interaction of the onboard computing systems and the central onboard computer via the trunk serial interface, and describes their manifestations. It provides a list of messages of interaction via the trunk serial interface required in localizing and correcting a malfunction, as well as requirements for collection and accumulation of the diagnostic information, and interaction of the central onboard computer with the onboard computer systems of the onboard control system. The paper notes that during control at the onboard computing systems manufacturer, it is necessary to check at the threshold values stability of the signals and interaction of the onboard computer systems and the central onboard computer in the presence of the unfavorable factors (malfunctions and failures) arising in operation via the trunk serial interface

Keywords

Onboard computer system, onboard control system, trunk serial interface, abnormal situation, network interface, interface device, central onboard computer

Received 20.01.2025

Accepted 14.05.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Puchkov A.V., Maksyutin A.S., Grinberg G.M. [Development of a simulator for testing spacecraft electric motor control system]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*. T. 1 [Actual problems of aviation and cosmonautics. Vol. 1]. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva Publ., 2022, pp. 652–654 (in Russ.). EDN: TBQVDG
- [2] Zyuzev A.M., Mudrov M.V., Nesterov K.E. Hardware and software simulators of electrotechnical complexes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2016, no. 2, pp. 58–62 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2016-2-58-62>
- [3] Nekrasov V.V., Dementyev D.Yu., Papenkin S.V., et al. Methodology for designing a microcontroller system flywheel rotor speed control for highly dynamic spacecraft. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2023, no. 3, pp. 101–118 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-3-8>
- [4] Zharkov V.I., Petrov M.N., Rizov I.T. Development of a remote terminal device for a multiplex data exchange channel on the FPGA. *Vestnik NovGU* [Vestnik NovSU], 2020, no. 2, pp. 16–19 (in Russ.). DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2\(118\).16-19](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2(118).16-19)
- [5] Reshetko V.M., Zaeva M.A., Urikh A.S., et al. [Modernization of the communication channel functionality in conditions of impossibility to change the physical realization of the data exchange environment of the on-board system]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu “ASU, informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy”* [State and Prospects of Development of Modern Science in the Direction of “ACS, Information and Telecommunication Systems”], 2019, pp. 85–89 (in Russ.). EDN: JYDNZH
- [6] Bykov A.P., Piganov M.N. Off-line tests technique for spacecraft onboard electronic devices. *Trudy MAI*, 2020, no. 111 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-7>
- [7] Bukirev A.S. Method for diagnosing an aircraft on-board equipment complex based on machine learning. *Trudy MAI*, 2023, no. 133 (in Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177672>
- [8] Savkin L.V. Bortovaya rekonfiguriruemaya sistema vstroennogo kontrolya i diagnostiki kosmicheskogo apparata [Spacecraft onboard reconfigurable integrated control and diagnostics system]. Patent RU 2604438. Appl. 22.07.2015, publ. 10.12.2016 (in Russ.).
- [9] Bykov A.P. Reliability performance measure model and method for avionics. *Radio-tekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy* [Radio Engineering and Telecommunications Systems], 2021, no. 1, pp. 17–23 (in Russ.).
- [10] Frolov A.A. Criteria for selection of reliability structure diagram for onboard control system of earth remote sensing satellites. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ* [Electromechanical Matters. VNIIEМ Studies], 2015, vol. 146, no. 3, pp. 30–37 (in Russ.). EDN: VTILSH

- [11] Kovel A.A., Gornostaev A.I. Stages of information support of development of on-board equipment for spacecraft. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii* [Spacecrafts & Technologies], 2021, vol. 5, no. 3, pp. 166–176 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.26732/j.st.2021.3.06>
- [12] Gorbunov S.F., Grishin V.Yu., Ereemeev P.M. Spacecraft network interfaces: development prospects and implementation problems. *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2019, no. 89, pp. 128–130 (in Russ.). EDN: ZHEXCP
- [13] Ayukaeva D.M., Voronin F.A., Poluarshinov M.A., et al. Integration of controllable scientific equipment into the russian segment of the international space station. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Engineering and Technology], 2020, no. 30, pp. 66–75 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-66-75>
- [14] Shcherbakova S.A., Ignatovskiy V.V., Filonova S.Yu. Information interchange multiplex channel module. *Vestnik SibGAU* [Vestnik SibSAU], 2015, vol. 16, no. 1, pp. 214–223 (in Russ.). EDN: TRIVDB
- [15] Degtyar V.G., Solovenko A.I., Akishev A.A. Physico-mathematical simulation stand for ground qualification of control system complexes. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket-Space Technology], 2019, vol. 1, pp. 39–44 (in Russ.). EDN: QFYGFR
- [16] Komarov V.A., Sarafanov A.V. Increasing the quality of ground experimental research of onboard electronic equipment for satellite control systems. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and Quality of Complex Systems], 2022, no. 3, pp. 61–69 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2022-3-8>
- [17] Akishev A.A. [Construction of a mathematical model of an aircraft for ground experimental testing of the control systems of rocket vehicles]. *Nauka XXI veka: problemy, poiski, resheniya* [Science of XXI Century: Problems, Searches, Solutions]. Miass, Geotur Publ., 2020, pp. 15–21 (in Russ.). EDN: OXTKMB
- [18] Grankina O.O. [Designing, manufacturing and testing of the on-board control complex of the remote sensing spacecraft]. *Informatika, upravlyayushchie sistemy, matematicheskoe i kompyuternoe modelirovanie* [Informatics, Control Systems, Mathematical and Computer Modeling]. Donetsk, DonNTU Publ., 2021, pp. 123–127 (in Russ.). EDN: HETKTC
- [19] Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vogorovskiy R.V., et al. Automation of testing the spacecraft command and measuring systems' characteristics and functional logic. *Issledovaniya naukoграда* [The Research of the Science City], 2016, no. 3-4, pp. 17–24 (in Russ.). EDN: XEJSSR
- [20] Kudryashova G.V., Babanov D.A., Galimzyanov A.T. Application of the method of load testing with ground experimental method of control units of antenna guidance system. *Vestnik SibGAU* [Vestnik SibSAU], 2016, vol. 17, no. 2, pp. 402–407 (in Russ.). EDN: XAYZCZ

Treshchetkin A.Yu. — Post-Graduate Student, Head of the Laboratory of Prototyping of Advanced Products, JSC “Research Institute “Submicron” (Georgievskiy prospekt 5, str. 2, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Gamzatov N.G. — Head of the Laboratory of Element Base Application, JSC “Research Institute “Submicron” (Georgievskiy prospekt 5, str. 2, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Nakhaev S.A. — Chief Programmer Specialist, JSC “Research Institute “Submicron” (Georgievskiy prospekt 5, str. 2, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Krasnova N.V. — Lead Software Engineer, JSC “Research Institute “Submicron” (Georgievskiy prospekt 5, str. 2, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Treshchetkin A.Yu., Gamzatov N.G., Nakhaev S.A., et al. General requirements for the trunk serial interface communication protocols. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 3 (152), pp. 49–63 (in Russ.). EDN: MYYPCS