

УДК 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.63.72 EDN LMNMMS

Применение аппаратно-программного комплекса автономного тестирования узла SpaceWire для проведения испытаний СБИС контроллера информационно-управляющего интерфейса

А. С. Максютин, *ellis1998@yandex.ru*

*АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева»,
г. Железногорск, Российская Федерация*

Д. С. Казайкин, *s6202@iss-reshetnev.ru*

*АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева»,
г. Железногорск, Российская Федерация*

Д. В. Дымов, *dymov@iss-reshetnev.ru*

*АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева»,
г. Железногорск, Российская Федерация*

Аннотация. В рамках данной статьи рассматривается применение аппаратно-программного комплекса тестирования узла SpaceWire, являющегося одной из составных частей унифицированного инструмента для проведения верификации и отработки устройств, имеющих в своем составе интерфейс SpaceWire, а также сетей, построенных на основе данной технологии — стенда комплексного тестирования бортовых сетей SpaceWire. В качестве объекта тестирования представлен макет функционального узла бортового прибора на основе СБИС контроллера информационно-управляющего интерфейса. Представлена структурная схема рабочего места тестирования вместе с кратким описанием входящих в него элементов. Сам процесс тестирования был разделен на несколько групп проверок, ориентированных на работу основных функциональных блоков тестируемого образца и освещен в виде обобщенного описания алгоритма тестирования с приведением характерных особенностей для каждой отдельной группы проверок. Приведены результаты тестирования макетного образца вместе с выводами о его соответствии обозначенным в эксплуатационной документации требованиям, а также с описанием выявленных особенностей его работы. В заключении приведены выводы о применимости аппаратно-программного комплекса тестирования узла SpaceWire при решении задач отработки и верификации новой продукции космической отрасли.

Ключевые слова: космические аппараты, бортовая аппаратура, испытательные стенды, алгоритмы тестирования, SpaceWire

Applying the Hardware and Software Complex of Autonomous Testing of the SpaceWire Node for Testing the VLSI Controller of the Information and Control Interface

A. S. Maksyutin, *ellis1998@yandex.ru*

*JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev,
Zheleznogorsk, Russian Federation*

D. S. Kazaykin, *s6202@iss-reshetnev.ru*

*JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev,
Zheleznogorsk, Russian Federation*

D. V. Dymov, *dymov@iss-reshetnev.ru*

*JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev,
Zheleznogorsk, Russian Federation*

Abstract. The paper considers the use of the hardware and software testing complex of the SpaceWire node, which is one of the components of a unified tool for verification and testing of devices incorporating SpaceWire interface, as well as networks based on this technology: that is a bench for complex testing of SpaceWire onboard networks. A mock-up of a functional unit of an onboard device based on VLSI controller of the information and control interface is presented as an object of testing. The paper gives a block diagram of the testing workplace along with a brief description of the elements included in it. The testing process was divided into several groups of checks focused on the main functional blocks of the sample being tested and is described in the form of a generalized description of the testing algorithm with characteristic features for each individual group of checks. The results of testing the mock-up sample are presented together with conclusions about its compliance with the requirements stated in the operational documentation, as well as with a description of the identified features of its operation. The conclusions about the applicability of the hardware and software testing complex of the SpaceWire node when solving the problems of adjustment and verification of new products of the space industry are presented in the conclusion.

Keywords: spacecraft, onboard equipment, test benches, testing algorithms, SpaceWire

Введение

SpaceWire является системообразующей технологией информационного взаимодействия на борту космического аппарата (КА). Главным образом технология отличается высокими скоростями передачи информации, малыми задержками доставки сообщений, устойчивостью к отказам и сбоям, низким энергопотреблением, компактной реализацией в сверхбольших интегральных схемах (СБИС) [1]. Все это делает SpaceWire технологией, отвечающей всем требованиям для эксплуатации в составе бортовых космических систем, вследствие чего она получила широкое распространение на КА ведущих мировых космических агентств, среди которых Европейское космическое агентство (ESA), Американское космическое агентство (NASA), а также Японское агентство космических исследований (JAXA) [2].

В отечественной космической отрасли на текущий момент технология не получила широкого распространения, однако ситуация может претерпеть изменения после принятия в 2022 г. стандарта ГОСТ Р 70020-2022 «Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов» [3], основанного на зарубежном стандарте SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C [4].

Стенд комплексного тестирования бортовых сетей SpaceWire

Важным фактором для интеграции новой технологии в космическую отрасль является наличие испытательной базы. Для развития такой базы в области технологии SpaceWire на сегодняшний день в АО «ИСС» ведется активная разработка стенда комплексного тестирования (СКТ) бортовых сетей (БС) SpaceWire. СКТ должен обеспечивать решение двух основных задач:

1. Тестирование и анализ различных топологий сети SpaceWire, в том числе топологий БС КА.
2. Тестирование устройств, имеющих в своем составе интерфейс SpaceWire на соответствие требованиям стандарта SpaceWire, а также стандартов и спецификаций транспортных протоколов,

работающих совместно со SpaceWire, таких как RMAP [5] и СТП-ИСС [6].

В рамках данной статьи предлагается уделить более тщательное внимание 2-й задаче. В структуре СКТ блок, отвечающий за ее решение, носит название комплекса автономного тестирования узла SpaceWire. Более подробно функционал и возможности данного комплекса можно оценить на примере его практического применения.

СБИС контроллера сетевого информационно-управляющего интерфейса

В рамках разработки системообразующего комплекта СБИС для бортовых сетей SpaceWire специалистами АО «ИСС» была разработана СБИС контроллера сетевого информационно-управляющего интерфейса [7]. По результатам проведенного анализа потребителей, обозначенной СБИС, была выявлена возможность ее реализации с гораздо меньшими массогабаритными характеристиками. Данная возможность была достигнута исключением процессорного блока. В результате чего была разработана СБИС контроллера сетевого информационно-управляющего интерфейса в металлокерамическом корпусе МК 5153.64-3 (далее — микросхема) [8]. Микросхема организует интерфейс для взаимодействия бортовой аппаратуры (БА) по сети SpaceWire и предназначена для применения в составе унифицированных интегрированных бортовых информационных систем перспективных КА.

Как и для любой другой новой продукции космической отрасли, для рассматриваемой микросхемы должна быть предусмотрена процедура верификации и отработки для полного и тщательного определения соответствия предъявляемым к ней требованиям [9].

Для оценки необходимого объема тестирования микросхемы была рассмотрена ее структурная схема, приведенная на рис. 1.

Как видно из рисунка, в состав микросхемы входят следующие функциональные блоки:

- контроллер UART (RS-232), организующий взаимодействие с внешним управляющим устройством;

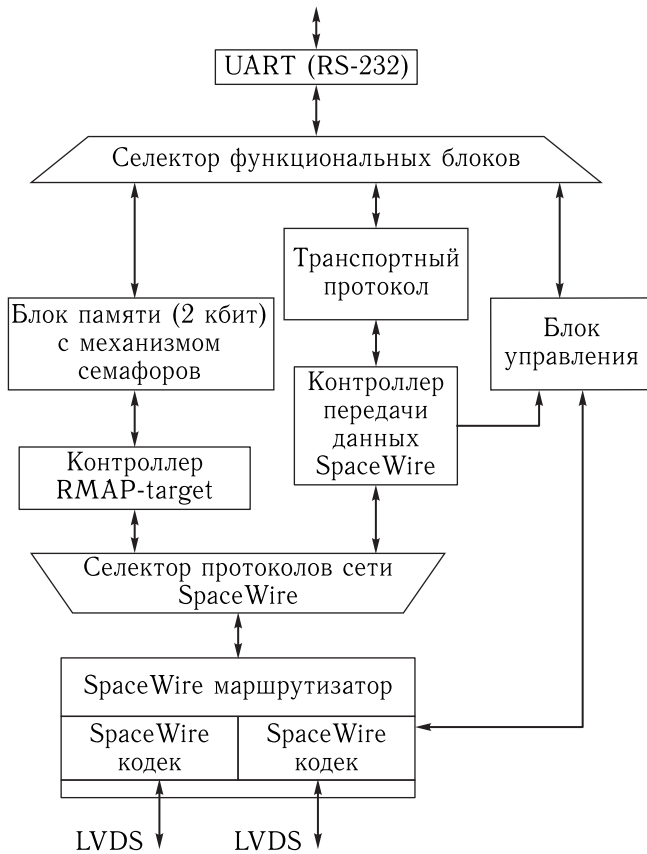


Рис. 1. Структурная схема микросхемы

– селектор функциональных блоков, осуществляющий коммутацию контроллера транспортного протокола внешних интерфейсов, блока памяти с механизмом семафоров и блока управления;

– контроллер транспортного протокола внешних интерфейсов, обеспечивающий контроль целостности при передаче данных через интерфейс для связи с внешним управляющим устройством;

– блок памяти с механизмом семафоров, предоставляющий единое адресное пространство для чтения и записи устройствам сети SpaceWire;

– блок управления, осуществляющий управление режимами функционирования ряда модулей микросхемы;

– контроллер передачи данных SpaceWire, осуществляющий преобразование формата данных;

– контроллер RMAP-target, реализующий функционал стандарта RMAP;

– селектор протоколов сети SpaceWire, осуществляющий коммутацию контроллера RMAP-target,

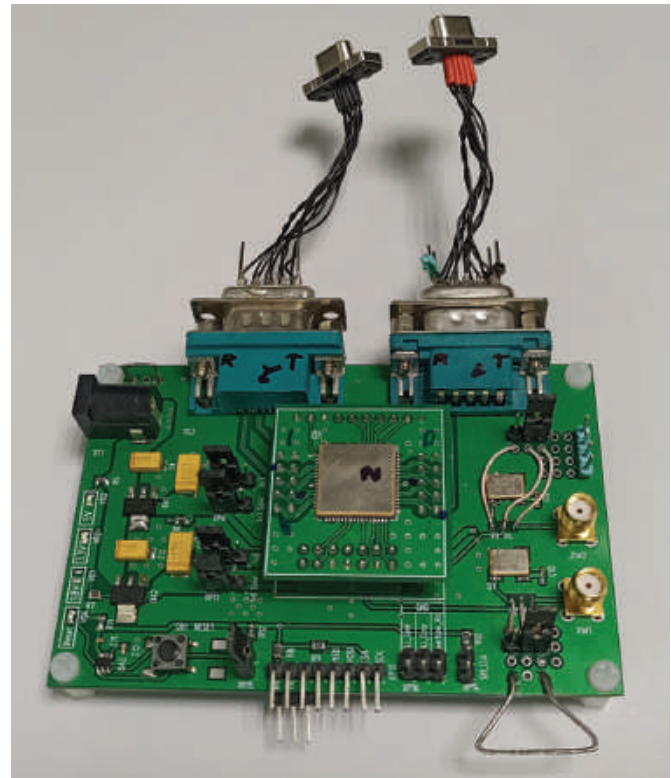


Рис. 2. Макет функционального узла бортового прибора на основе микросхемы

контроллера передачи данных SpaceWire и маршрутизатора SpaceWire;

– маршрутизатор SpaceWire, реализующий функционал стандарта SpaceWire;

– кодеки SpaceWire, реализующие функционал стандарта SpaceWire;

– LVDS.

На рис. 2 представлен макет функционального узла бортового прибора на основе микросхемы, изготовленный для ее функционального тестирования.

Сборка рабочего места

Для функционального тестирования микросхемы был применен комплекс автономного тестирования узла SpaceWire. Для этого было собрано типовое для комплекса рабочее место, структурная схема которого представлена на рис. 3.

Краткое описание представленного на структурной схеме оборудования приведено в таблице.

Собранное рабочее место показано на рис. 4.

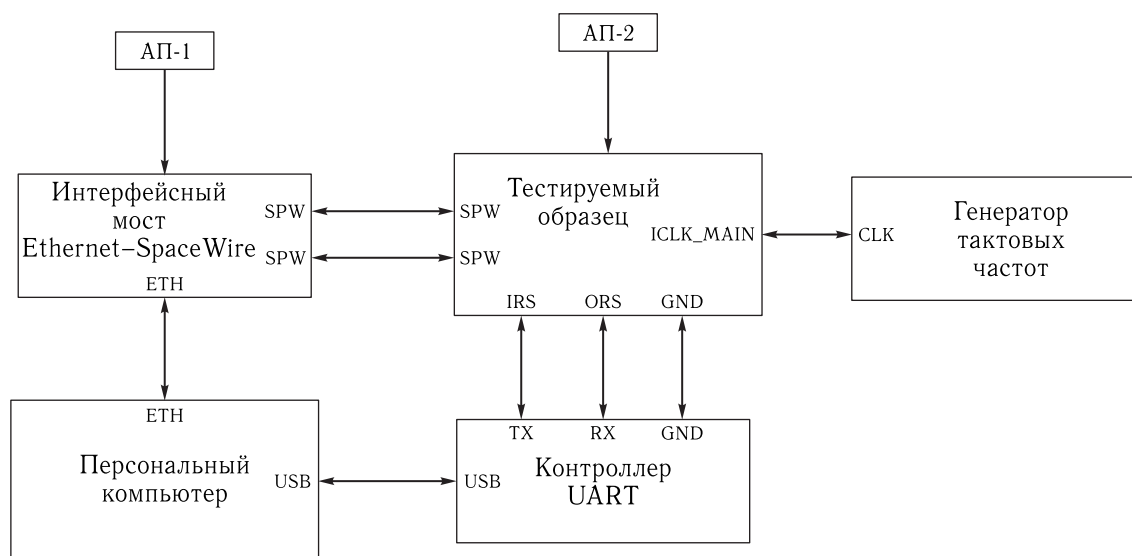


Рис. 3. Структурная схема рабочего места для тестирования микросхемы

Таблица. Описание оборудования, находящегося в составе комплекса автономного тестирования узла SpaceWire

№	Оборудование	Описание
1	Персональный компьютер (ПК)	Управляющее устройство, предназначенное для выдачи команд на непосредственно тестируемый образец и на интерфейсный мост
2	Интерфейсный мост Ethernet-SpaceWire	Устройство, предназначенное для возможности осуществления подключения ПК через интерфейс Ethernet к сети SpaceWire [10]
3	Контроллер UART	Устройство, предназначенное для возможности осуществления передачи пакетов UART с ПК на тестируемый образец [11]
4	Тестируемый образец	Макет функционального узла бортового прибора на основе микросхемы
5	Генератор тактовых частот	Устройство, предназначенное для подачи тактовых частот на микросхему
6	Адаптер питания (АП-1) интерфейсного моста	Адаптер питания на 24 В
7	Адаптер питания (АП-2) тестируемого образца	Адаптер питания на 5 В
8	Кабель Ethernet	Кабель для соединения ПК с интерфейсным мостом
9	Кабель SpaceWire	Кабель для соединения моста с тестируемым образцом
10	Кабель USB	Кабель для соединения ПК с контроллером UART
11	Линия TX-IRS	Линия, отвечающая за передачу данных по интерфейсу UART с контроллера UART на тестируемый образец
12	Линия RX-ORS	Линия, отвечающая за прием данных по интерфейсу UART на контроллер UART с тестируемого образца
13	Линия GND	Заземление
14	Линия CLK-ICLK_MAIN	Линия, отвечающая за подачу тактовой частоты на тестируемый образец

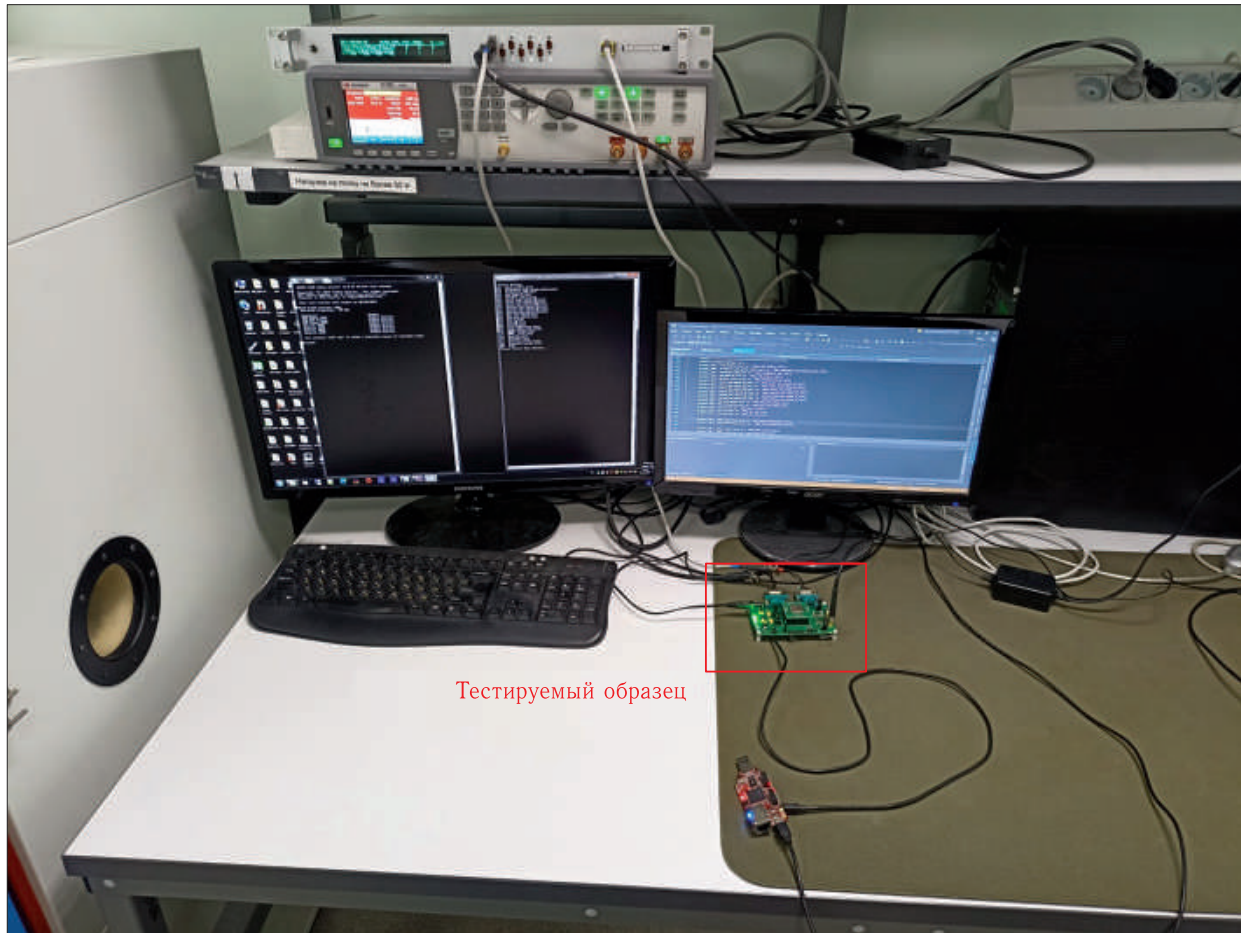


Рис. 4. Собранное рабочее место

Проведение тестирования

Основные группы проверок, объем которых достаточен для получения информации, необходимой для оценки соответствия тестируемого образца положениям, обозначенным в эксплуатационной документации на микросхему:

1. Проверка корректности работы тестируемого образца в соответствии с заданными параметрами в регистрах блока управления:

- отключение питания блоков LVDS кодеков SpaceWire при заданном значении регистра «spw_pwn» = 0;

- прерывание соединения по каналам SpaceWire кодеков и отсутствие установки нового соединения при заданном значении регистра «disable_spw» = 0;

- разрешение установки рабочей скорости канала SpaceWire при заданном значении регистра «select_custom_speeds» = 1;

- отключение функции отправки и приема таймкодов в кодеках SpaceWire при заданном значении регистра «forbid_timecodes» = 1;

- включение блока PLL ядра при заданном значении регистра «pll_en» = 0.

2. Проверка корректности работы кодеков SpaceWire:

- проверка возможности установки соединения тестируемого образца с мостом;

- проверка соотношения тактовой частоты и скорости работы кодеков (2 : 1) тестируемого образца;

- проверка работы кодеков SpaceWire на различных скоростях (10, 20, 50, 100 Мбит/с), в том числе на минимальной скорости (2 Мбит/с);

– проверка корректности частоты работы кодеков SpaceWire при задании различных значений коэффициентов умножения частоты блока PLL (от 1 до 25).

3. Проверка поддержки путевой адресации для первого и второго портов SpaceWire тестируемого образца.

4. Проверка передачи данных по интерфейсу UART (RS-232) тестируемого образца на кодеки SpaceWire и далее на мост и наоборот.

– проверка передачи тестируемым образцом большого количества пакетов SpaceWire (1000);

– проверка приема тестируемым образцом большого количества пакетов SpaceWire (1000);

– проверка передачи тестируемым образцом пакета SpaceWire большого размера (1000 байт);

– проверка приема тестируемым образцом пакета SpaceWire большого размера (1000 байт).

5. Проверка поддержки контроллером RMAP-target тестируемого образца ключевых механизмов транспортного протокола RMAP:

– проверка поддержки команды записи RMAP;

– проверка поддержки команды чтения RMAP;

– проверка поддержки команды RMW RMAP;

– проверка корректной обработки команд RMAP, содержащих ошибки.

Перед началом тестирования для верификации обозначенных проверок была проведена их отработка на сертифицированном оборудовании компании STAR-Dundee [12].

Все представленные проверки могут быть описаны одним обобщенным алгоритмом с некоторыми корректировками в каждом отдельном случае. Далее приводится описание обобщенного алгоритма.

На первом этапе происходит подготовка рабочего места, заключающаяся в подаче питания и тактовой частоты на тестируемый образец, подаче питания на интерфейсный мост Ethernet–SpaceWire (далее — мост). Затем происходит запуск на ПК отладчика GRMON [13] для связи ПК и контроллера UART. Далее на ПК формируется пакет UART, содержащий в себе последовательность байт, предназначенных для записи в регистры блока управления тестируемого образца. Данный пакет отправляется через контроллер UART на тестируемый образец, таким образом конфигурируя его. После этого на ПК запускается управляющее ПО для моста,

посредством которого мост реализует некоторый набор действий по каналу SpaceWire, соединенному с тестируемым образцом (установка соединения, отправка пакета и т. д.). После этого также посредством моста происходит контроль за реакцией тестируемого образца и на основании этой реакции формируется вывод о корректности его работы и успешности прохождения теста.

Блок-схема обобщенного алгоритма тестирования (подготовка рабочего места опущена) представлена на рис. 5.

Как было сказано, разные группы тестов имеют свои особенности. Предлагается изложение особенностей прохождения каждой группы тестов.

Для первой группы тестов особенностью являются определенные настройки регистров блока управления. Например, регистр «disable_spw», установленный в значение 0, должен блокировать возможность установки соединения по каналам SpaceWire кодеков тестируемого образца. После такой конфигурации тестируемого образца со стороны моста предпринимается несколько попыток установки соединения. Если все данные попытки оказались неудачными, это свидетельствует о корректной работе тестируемого образца и успешном прохождении проверки. Аналогичные проверки проводятся для других обозначенных регистров блока управления.

Для второй группы тестов особенностью являются настройки регистров блока управления, связанные с тактовой частотой работы кодеков SpaceWire. Это регистр управления скоростью «speed», а также регистр управления значением коэффициента умножения тактовой частоты блока PLL. После такой конфигурации тестируемого образца со стороны моста предпринимается попытка установки соединения на соответствующей частоте. При удачной попытке установки соединения, а также при проверке его стабильности в течение короткого промежутка времени работа тестируемого образца считается корректной и тест пройден успешно. Проверки проводятся для нескольких значений тактовых частот работы кодеков SpaceWire с использованием и без использования блока PLL.

Третья и последующие группы тестов не предусматривают специфичных настроек регистров блока управления. Задается конфигурация тестируемого

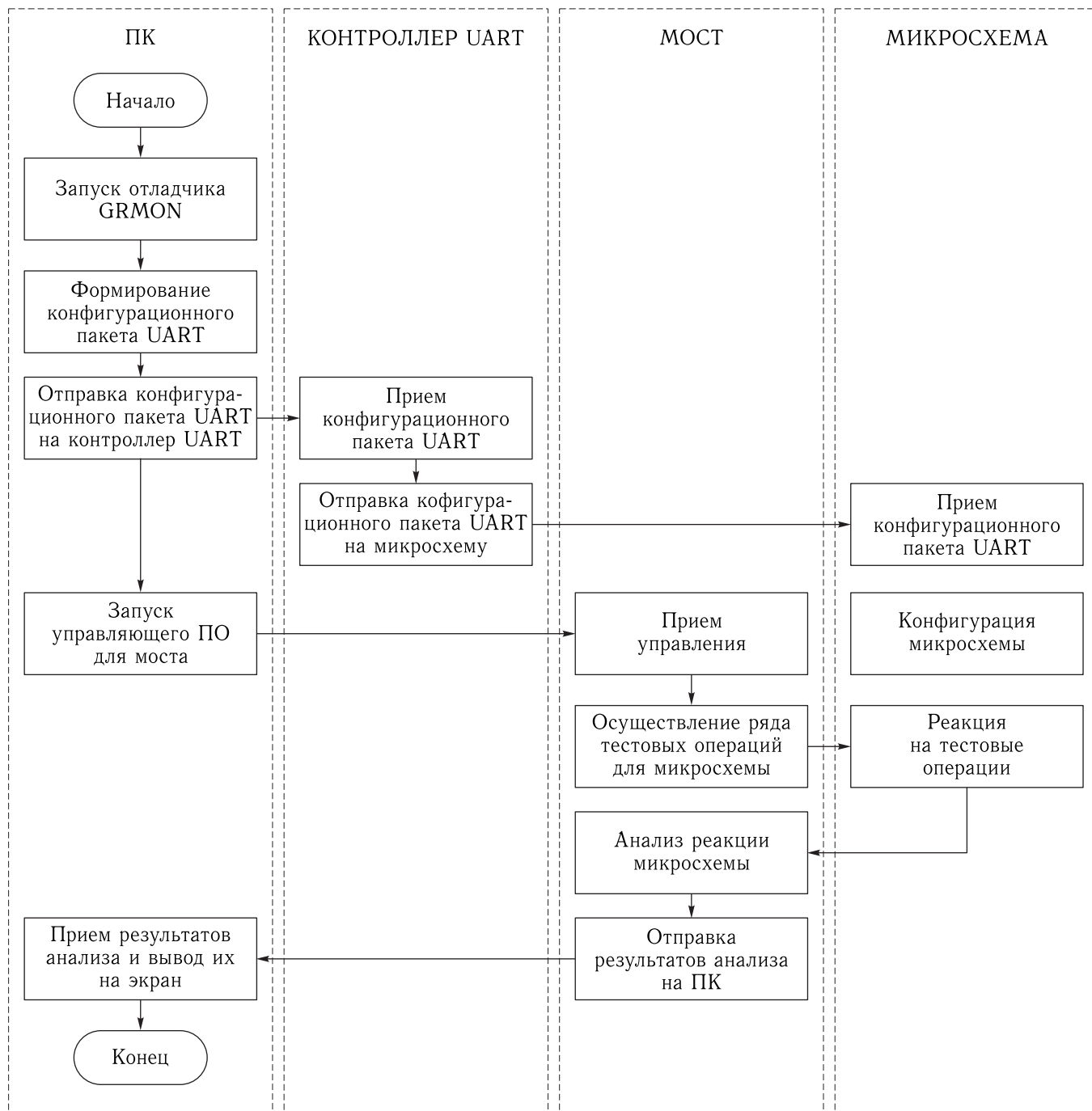


Рис. 5. Блок-схема обобщенного алгоритма тестирования

образца, обеспечивающая стабильное соединение с мостом по каналу SpaceWire.

Для третьей группы тестов особенностью являются тестовые пакеты SpaceWire, отправляемые с моста на тестируемый образец после его конфигурации и установки соединения по каналу. Дан-

ные пакеты содержат в своем первом байте значения (00 или 01), которые должны быть восприняты тестируемым образцом как путь адрес. Вследствие этого первый байт такого пакета отбрасывается и далее пакет отправляется обратно на мост. В случае приема данного пакета мостом работа

тестируемого образца считается корректной и тест пройден успешно. Проверка проводится для обоих портов SpaceWire тестируемого образца.

Для четвертой группы тестов особенностью является количество и размер тестовых пакетов SpaceWire, отправляемых с моста на тестируемый образец, и наоборот, после его конфигурации и установки соединения по каналу. Таким образом, возможны 4 различных случая: большое количество пакетов малого размера отправляется с тестируемого образца на мост, один пакет большого размера отправляется с тестируемого образца на мост, а также обратные ситуации, когда пакеты отправляются с моста на тестируемый образец. В случае корректного приема пакетов/пакета мостом/тестируемым образцом работа тестируемого образца считается корректной и тест пройден успешно.

Для пятой группы тестов особенностью является отправка различных команд транспортного протокола RMAP с моста на блок RMAP-target тестируемого образца после его конфигурации и установки соединения по каналу. Например, при отправке команды чтения тестируемый образец должен отправить обратно пакет, содержащий информацию о хранящихся данных в обозначенном в исходной команде чтения адресе. В случае приема данного пакета работа тестируемого образца считается корректной и тест пройден успешно. Аналогичные проверки проводятся для других типов команд, а также команд, содержащих ошибки.

Результаты тестирования

Для первой группы проверок (корректность работы тестируемого образца в соответствии с заданными параметрами в регистрах блока управления) комплекс позволил выявить, что тестируемый образец работает корректно.

Для второй группы проверок (корректность работы кодеков SpaceWire) комплекс позволил выявить:

1. Тестируемый образец может устанавливать соединение с мостом.
2. Для тестируемого образца соотношение тактовой частоты и скорости работы кодеков равняется 1 : 1, а не 2 : 1.

3. Кодеки SpaceWire тестируемого образца могут работать на скоростях до 350 Мбит/с, а не только на обозначенных в тесте скоростях (2, 10, 20, 50, 100 Мбит/с).

4. Частоты работы кодеков SpaceWire тестируемого образца устанавливаются корректно в соответствии со значениями, заданными для коэффициента умножения блока PLL до значения 70, а не только на обозначенном в тесте диапазоне (от 1 до 25).

Для третьей группы проверок (поддержка путовой адресации для первого и второго портов SpaceWire тестируемого образца) комплекс позволил выявить, что тестируемый образец работает корректно.

Для четвертой группы проверок (передача данных по интерфейсу UART (RS-232) тестируемого образца на кодеки SpaceWire и далее на мост и наоборот) комплекс позволил выявить:

1. Тестируемый образец может передавать большое количество пакетов SpaceWire (1000), а также передавать пакет SpaceWire большого размера (1000 байт).

2. Приемный буфер тестируемого образца при приеме пакетов SpaceWire, ввиду больших разностей скоростей работы интерфейсов UART и SpaceWire (даже при относительно низкой скорости SpaceWire), не успевает очищаться, передавая их далее по UART. Из-за этого наступает переполнение буфера и невозможность дальнейшего приема пакетов. Предельный суммарный размер пакетов или пакета SpaceWire составляет 115 байт. В связи с этим рекомендуется посылать на микросхему пакеты или пакет, суммарный размер которых не превышает 100 байт.

Для пятой группы проверок (поддержка контроллером RMAP-target тестируемого образца ключевых механизмов транспортного протокола RMAP) комплекс позволил выявить:

1. Тестируемый образец поддерживает команду записи RMAP.

2. Для тестируемого образца при приеме команд чтения и RMAP из памяти доступен для чтения только один байт по обозначенному в исходной команде адресу.

3. Тестируемый образец корректно обрабатывает команды RMAP, содержащие ошибки.

Заключение

В ходе решения задачи функционального тестирования микросхемы была применена одна из составных частей СКТ БС — комплекс автономного тестирования узла SpaceWire. Комплекс позволил произвести ряд проверок на макете функционального узла бортового прибора на основе микросхемы, позволивших в одном случае подтвердить, а в другом скорректировать положения данные в эксплуатационной документации на микросхему, тем самым также предоставив информацию, необходимую для оценки возможности ее применения в составе БА.

Список литературы

1. Шейнин Ю. Е., Солохина Т. В., Петричкович Я. Я. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределительных комплексов // Электроника: наука, технология, бизнес, 2007, № 1. С. 38–49.
2. Дымов Д. В., Двирный В. В., Еременко Н. В. Перспективы применения сетевой технологии SpaceWire на российских спутниках // Решетневские чтения, 2015, № 1. С. 105–103.
3. ГОСТ Р 70020-2022. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. SpaceWire-RUS. Общие требования. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 февраля 2022 г. № 80-ст. Дата введения 2022-06-01.
4. ECSS-E-ST-50-12C. Space engineering. SpaceWire — Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands.
5. Remote memory access protocol (normative). <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWire%20RMAP%20Protocol%20Draft%20F%204th%20Dec%202006.pdf> (Дата обращения 05.01.2023).
6. Шейнин Ю. Е., Оленев В. Л., Лавровская И. Я., Дымов Д. В., Кочура С. Г. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire // Исследования наукограда, 2014, № 1–2. С. 21–30.
7. Дымов Д. В., Эннс В. И., Эннс А. В., Казайкин Д. С., Полещук В. В., Андреев А. С., Леонова А. В. Комплект СБИС для построения бортовых сетей SpaceWire // Наноиндустрия, 2020, № S96-1. С. 190–199.
8. Нагаев Н. А. Тенденции развития металлокерамических корпусов // Электроника: наука, технология, бизнес, 2018, № 8. С. 114–121.
9. Голубев Е. Н., Николаев А. О. Развитие и совершенствование методики стендовых испытаний бортового комплекса управления космического аппарата // Вестник сибирского государственного университета им. академика М. Ф. Решетнева, 2013, № 2. С. 128–132.
10. 4Links Application Interface. <https://www.4links.co.uk/index.php/portfolio/project-title-2> (Дата обращения 07.01.2023).
11. Spartan-6 Product Advantage. <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/spartan-6.html> (Дата обращения 13.01.2023).
12. SpaceWire Brick Mk4. https://www.star-dundee.com/products/spacewire-brick-mk4/#product_features (Дата обращения 13.01.2023).
13. GRMON3 debugging made easy. <https://www.gaisler.com/index.php/products/debug-tools/grmon3> (Дата обращения 21.01.2023).

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.02.2023
Дата принятия рукописи
в печать 11.04.2023