

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 629.7.05 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.5.13 EDN ZQNYNI

**Испытания бортовой аппаратуры
космического назначения.
Часть 2. Дополнительные натурные испытания
на орбитальной станции**

Г. А. Ерохин, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Жуков, д. т. н., профессор, zhukov.aa@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация

В. А. Соловьев, д. т. н., профессор, академик РАН, post@rsce.ru

ПАО «РКК “Энергия”», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

Р. М. Самитов, post@rsce.ru

ПАО «РКК “Энергия”», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

А. Е. Тюлин, д. э. н., к. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

О. Е. Хромов, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И. В. Чурило, к. т. н., post@rsce.ru

ПАО «РКК “Энергия”», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. Показана целесообразность проведения дополнительных натурных испытаний бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА) (включая приборы, их компоненты и материалы) на Международной космической станции (МКС) и/или Российской орбитальной служебной станции (РОСС) до начала летных испытаний (ЛИ) КА. Изложена методика их проведения в условиях синергетического воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФКП) и флуктуации функциональных воздействий (гравитационных и/или магнитных полей Земли, Солнца, Луны, полей мировых техногенных систем наземной и космической связи и навигации, излучения звезд, планет, спутников, КА) при функционировании аппаратуры по штатным алгоритмам. Показано принципиальное различие между традиционным сквозным циклом испытаний БА и сквозным циклом с дополнительными испытаниями на орбитальной станции. Проведение дополнительных натурных испытаний бортовой аппаратуры позволит заранее выявить ее слабые места. По результатам выявленных замечаний проводится коррекция конструкторской и программной документации, доработка образцов НЭО и проведение дополнительной НЭО. По положительным результатам дополнительной НЭО образцов БА дорабатывается БА, предназначенная для летных испытаний КА. Указанные мероприятия повышают вероятность проведения ЛИ КА с положительным результатом и передачи КА № 1 в полноценную штатную эксплуатацию. Подробно показано, что унификация всех этапов подготовки и проведения испытаний сократит требуемые временные и финансовые затраты, а также обеспечит их доступность для различной БА.

Ключевые слова: дестабилизирующие факторы космического пространства, аппаратура, роботизированный манипулятор

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Testing of Onboard Equipment for Space Purposes. Part 2. Additional In-Situ Testing on the Orbital Station

G. A. Erokhin, *Cand. Sci. (Engineering)*, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Zhukov, *Dr. Sci. (Engineering)*, *Professor*, zhukov.aa@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

V. A. Solovyev, *Dr. Sci. (Engineering)*, *Professor*, *member of RAS*, post@rsce.ru

Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev, Moscow region, Russian Federation

R. M. Samitov, post@rsce.ru

Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev, Moscow region, Russian Federation

A. E. Tyulin, *Dr. Sci. (Econ.)*, *Cand. Sci. (Engineering)*, *Prof.*, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

O. E. Khromov, *Cand. Sci. (Engineering)*, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

I. V. Churilo, *Cand. Sci. (Engineering)*, post@rsce.ru

Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev, Moscow region, Russian Federation

Abstract. This article demonstrates the importance of conducting additional ground experimental testing of spacecraft onboard equipment (including instruments, components, and materials) on the International Space Station (ISS) and/or the Russian Orbital Service Station (ROSS) prior to the start of spacecraft flight tests (FT). The methodology of conducting these tests under the synergistic effects of destabilizing factors of space (DFS) and fluctuations of functional influences (gravitational and/or magnetic fields of the Earth, Sun, Moon, fields of world man-made systems of ground and space communication and navigation, radiation from stars, planets, satellites, and spacecraft) during the operation of equipment according to standard algorithms is presented. The fundamental difference between the traditional cyclic testing of onboard equipment and the cyclic testing with additional experimental testing of onboard equipment on the orbital station is shown. Conducting additional in-situ testing of onboard equipment will allow for the identification of its weak points in advance. Based on the identified issues, design and software documentation corrections, modification of the testing samples, and additional in-situ testing are carried out. Positive results of additional in-situ experimental testing of onboard equipment samples will lead to the modification of onboard equipment intended for spacecraft flight tests. These measures increase the likelihood of successful spacecraft flight tests and the transfer of the spacecraft No. 1 to full standard operation. It is shown in detail that the unification of all stages of preparation and testing will reduce the required time and financial costs and make them more accessible for various onboard equipment

Keywords: destabilizing factors of outer space, equipment, robotic arm

Введение

Ранее нами в части 1 («Синергизм воздействия факторов космического пространства») было показано, что космическое пространство синергетически и деструктивно действует на бортовую аппаратуру, приборы, компоненты и материалы космических аппаратов. Как следствие, представляется целесообразным проведение дополнительных испытаний бортовой аппаратуры КА в реальных условиях в космосе. В этой связи исследование и разработка методики дополнительных натурных испытаний на орбитальной станции представляется задачей актуальной.

Целью работы является разработка алгоритмов дополнительных натурных испытаний бортовой аппаратуры в открытом космическом пространстве на орбитальной станции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать алгоритмы проведения наземных и летных испытаний бортовой аппаратуры и выявить возможности их улучшения;
- предложить алгоритм дополнительных испытаний бортовой аппаратуры КА в реальных условиях в космосе;
- предложить аппаратную реализацию дополнительных натурных испытаний бортовой аппаратуры;
- проанализировать предлагаемую последовательность и технологию подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры на орбитальной станции.

Наземные отработочные испытания при одновременном воздействии на испытываемую бортовую аппаратуру

Процесс отработочных испытаний можно описать как последовательность следующих шагов.

Шаг 1. Формирование множества суммарных воздействий $S_{\text{и}}$ планируемых испытаний.

Шаг 2. Проведение испытаний на множестве $S_{\text{и}}$.

Шаг 3. Анализ результатов испытаний, оценка принятых при проектировании решений и опреде-

ление множества $S_{\text{кр}}$. Если $S_{\text{кр}} = \emptyset$, то процесс завершен, в противном случае корректируется конструкторская документация, осуществляется возврат к шагу 2 и проводятся испытания на множестве воздействий $S_{\text{и}} = S_{\text{кр}}$.

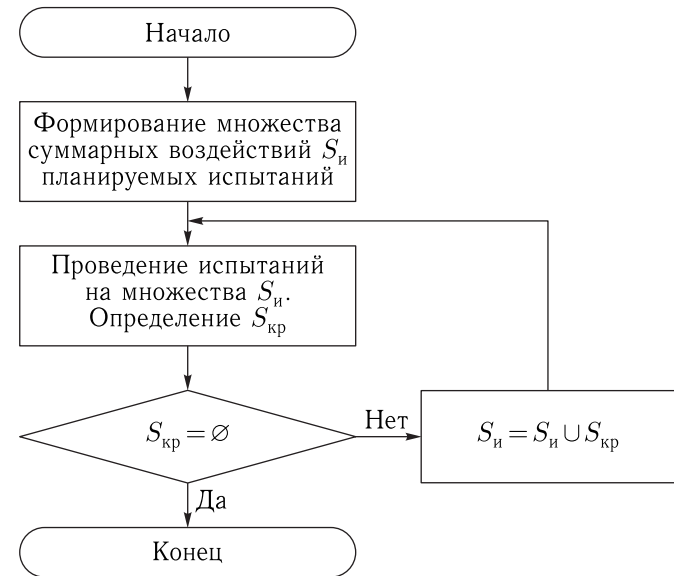


Рис. 1. Наземные отработочные испытания при одновременном суммарном множестве ряда воздействий

При наземных отработочных испытаниях (рис. 1) воздействия на испытываемую бортовую аппаратуру имитируют соответствующие стенды, в большинстве своем достаточно сложные и громоздкие. Очевидно, что при выполнении шага 1 (формирование множества суммарных воздействий $S_{\text{и}}$ планируемых испытаний), возникает противоречие между желанием предусмотреть как можно больше сочетаний воздействий, с одной стороны, и организационно-техническими и финансовыми возможностями, с другой стороны. На практике это приводит к сокращению множества суммарных воздействий $S_{\text{и}}$, и в первую очередь сокращается объем совместных испытаний на одновременное воздействие нескольких разнородных факторов. Такое сокращение объема испытаний основывается на гипотезе о том, что реакция БА на воздействие из множества D_i не зависит от реакции на воздействие из множества D_j при $i \neq j$ при одновременном воздействии нескольких разнородных факторов.

Следствием сокращения совместных испытаний на одновременное воздействие нескольких

разнородных факторов является то, что реальному, одновременному воздействию всех факторов бортовая аппаратура впервые подвергается на этапе летных испытаний космического аппарата. В этом случае, при обнаружении критических суммарных воздействий на этапе летных испытаний, замечание к бортовой аппаратуре будет устранено только на следующем космическом аппарате и КА № 1 в лучшем случае будет использован по целевому назначению с ограничениями. Данная ситуация отражена на рис. 2. В некоторых случаях, при создании особо ответственной БА практикуются ее испытания как дополнительной аппаратуры на «попутном» КА. Суть испытаний заключается в том, что для проведения дополнительных испытаний подбирается планируемый к запуску по другой программе КА, на котором можно разместить аппаратуру с дополнительными объемами, массой, энергопотреблением. Желательно, чтобы КА имел орбиту, представляющую интерес с точки зрения

испытаний БА. В процессе полета КА проводятся испытания дополнительной аппаратуры. Основным преимуществом такого подхода является проведение дополнительных испытаний бортовой аппаратуры в космическом пространстве в условиях одновременного воздействия всех реальных факторов. В этом случае повышается вероятность обнаружения критических суммарных воздействий до начала летных испытаний и замечания к бортовой аппаратуре могут быть устранены до пуска первого космического аппарата. Для проведения указанных испытаний необходимо провести работы по стыковке испытуемой дополнительной БА с системами «попутного» КА. Это конструктивная, электрическая, информационная и многие другие виды стыковки. Указанные работы при таком подходе необходимо проводить каждый раз по-новому для различных КА и БА, что влечет значительные финансовые и временные затраты на проведение подобных испытаний.

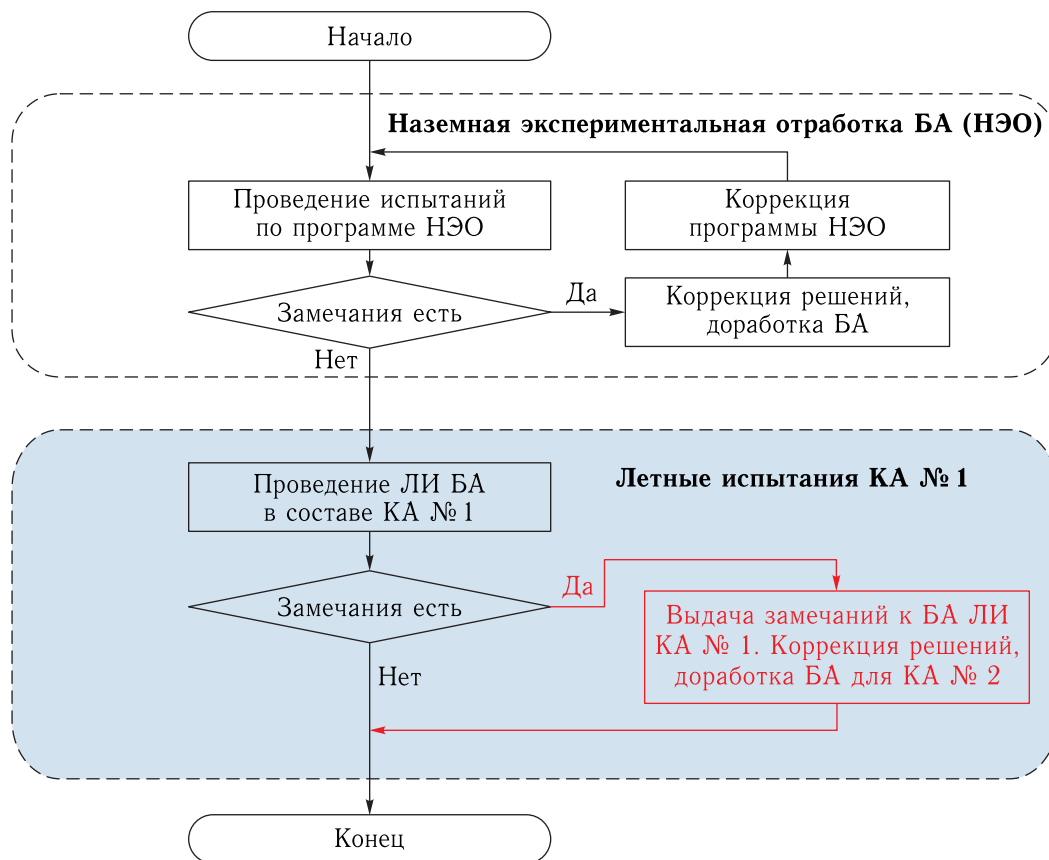


Рис. 2. Принятый сквозной алгоритм испытаний бортовой аппаратуры в составе КА

Сквозной алгоритм испытаний бортовой аппаратуры, включая дополнительные натурные испытания на орбитальной станции

Предложено проведение дополнительных натурных испытаний БА на орбитальной станции (ОС) (рис. 3). Во время этих испытаний БА также подвергается одновременному воздействию всех реальных факторов. При этом БА проверяется в условиях реальных навигационных, электромагнитных, гравитационных полей на орбите ОС. В некоторых случаях на фоне указанных воздействий крайне важно расположение БА в пространстве, например по отношению к станциям наземного сектора системы связи. Сымитировать одновременно указанные функциональные воздействия в наземных условиях с учетом динамики полета КА с целью тщательного тестирования алгоритма работы БА крайне затруднительно.

Подобная ситуация, например, возникла при создании бортовой интегрированной системы управления (БИСУ) наноспутника ТНС-0 № 2, которая использует в процессе работы все функциональные воздействия, приведенные в предыдущем абзаце, а также текущие результаты измерения оптических датчиков, определяемых динамически изменяющимся положением Солнца, Земли, Луны и самого КА. Учитывая изложенное, первые испытания в условиях воздействия реальных функциональных воздействий одновременно с ДФКП произошли на этапе летных испытаний. Для технологического спутника это еще приемлемо, а в случае создания группировки КА, проведение дополнительных натурных испытаний на орбитальной станции позволит устранить замечания к БА до начала разворачивания группировки.

В качестве еще одного примера можно привести задачу испытаний звездных датчиков, для которых в дополнение к перечисленным воздействиям требуются текущие изображения звездного неба.

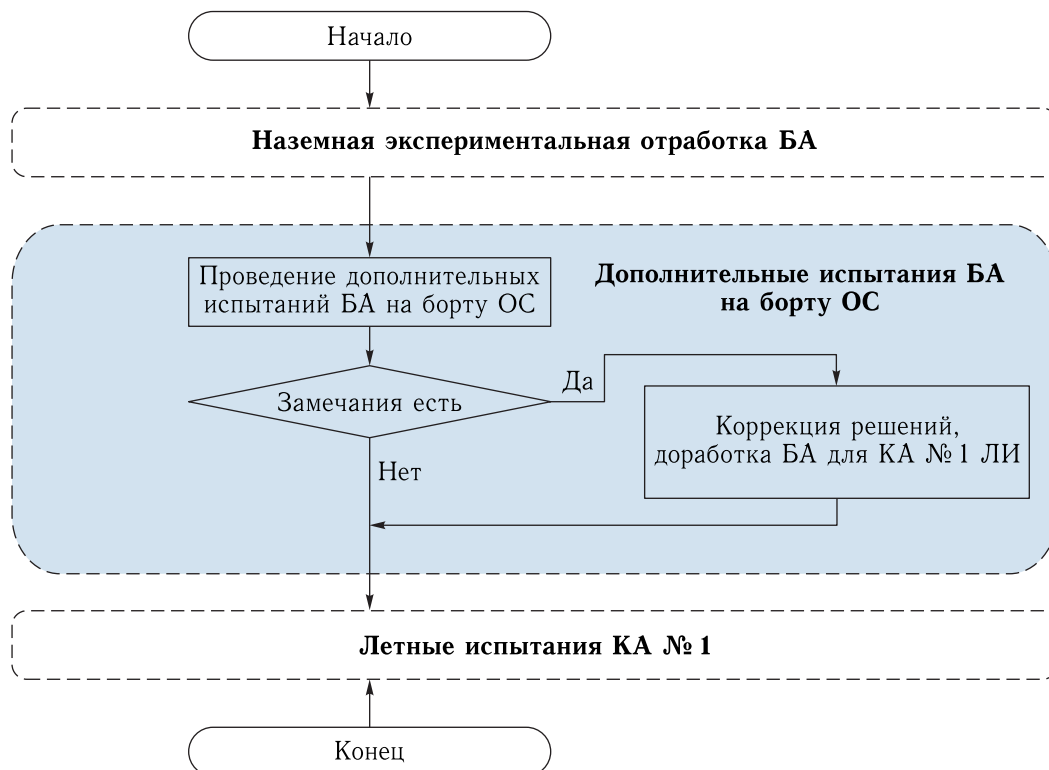


Рис. 3. Сквозной алгоритм испытаний бортовой аппаратуры, включая дополнительные натурные испытания на орбитальной станции

Основными целями при организации дополнительных натурных испытаний на орбитальной станции являются:

(А) Фиксация критических совокупных функциональных воздействий и дестабилизирующих факторов космического пространства на БА, при которых есть замечания к ее функционированию, выработка рекомендаций по коррекции решений, заложенных при создании БА, и ее доработке до начала летных испытаний либо подтверждение правильности заложенных решений.

(Б) Снижение финансовых и временных затрат на проведение дополнительных испытаний БА в КП и обеспечение их доступности для унифицированной БА различного назначения.

Цель (А) в основном достигается тем, что испытания проводятся на борту орбитальной станции и функциональные воздействия на БА в условиях синергетического действия дестабилизирующих факторов космического пространства определяются орбитой полета.

В [1] отмечено, что особую опасность для космических аппаратов представляют формирующиеся в магнитосфере радиационные пояса (внешний и внутренний пояса Ван Аллена), полярные регионы с открытыми силовыми линиями магнитного поля, аномалии геомагнитного поля в виде Бразильской магнитной аномалии. Данные о структуре магнитного поля Земли и его изменениях представлены в Атласе магнитного поля Земли [2].

Помимо указанной информации, при послеполетном анализе оценки работоспособности БА в условиях воздействия факторов космической погоды используется информация с датчиков орбитальной станции и с датчиков воздействий из состава бортовой испытательной аппаратуры. Для достоверной оценки реакции БА на воздействия осуществляется их непрерывная координатно-временная привязка. Для достижения цели (Б) предлагается унификация решений на всех этапах подготовки и проведения испытаний, что позволит сократить требуемые временные и финансовые затраты.

Кроме того, унификация конструктивных решений позволяет при обязательной предполетной проверке БА использовать унифицированную КПА, что также сокращает финансовые и временные затраты на эти работы. На этапе непосредственного

проведения испытаний на борту орбитальной станции становятся доступными ее информационные ресурсы, Бортовые средства управления испытаниями и обработки их результатов становятся одинаковыми для разных типов БА.

Аппаратная реализация системы для проведения предварительных натурных испытаний бортовой аппаратуры на орбитальной станции

Попытки осуществлять сборку конструкций в космосе предлагались и ранее [3], однако проводить натурные испытания бортовой аппаратуры под электрической нагрузкой с последующим возвратом на Землю предложено впервые. Предложена система для проведения натурных испытаний аппаратуры в космосе, включающая выносной крейт (рис. 4), располагаемый в открытом космическом пространстве вне герметичного отсека космического аппарата, для размещения испытуемой аппаратуры в составе по крайней мере одного унифицированного модуля и по крайней мере одного унифицированного служебного блока, связанного электрически и информационно с внутренним блоком тестовой аппаратуры.

Предложен выносной крейт для испытаний бортовой аппаратуры, размещаемый в унифицированном модуле, возвращаемом после экспозиции.

Унифицируемые конструктивные решения:

- конструкция унифицированных модулей с испытуемой бортовой аппаратурой,
- информационные сечения,
- сечения электропитания и управления,
- сечения теплообмена.

Унификация конструктивных решений позволяет на транспортных этапах испытаний применять прогрессивные решения, заложенные на орбитальной станции:

- технологию автоматизированного складирования на ОС,
- технологию работ с роботом-манипулятором ОС.

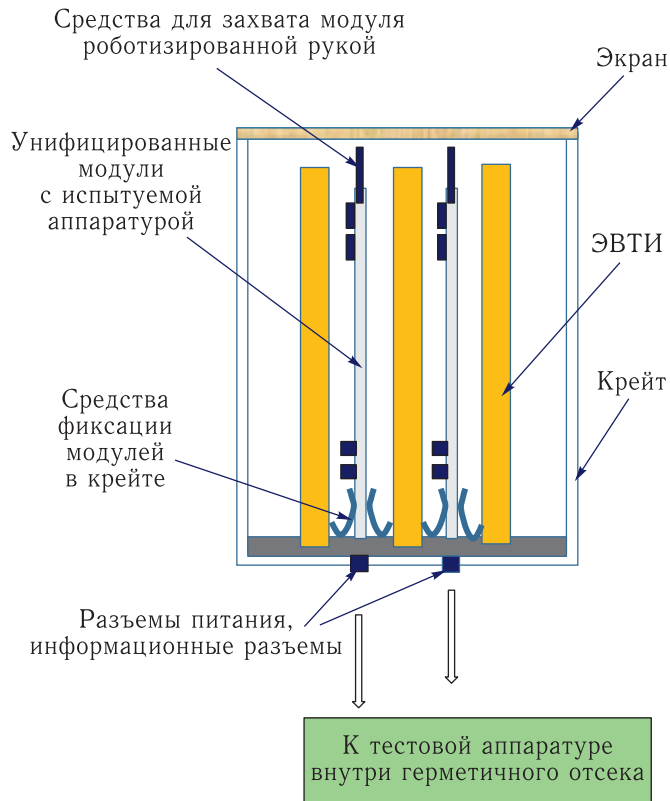


Рис. 4. Крейт для предварительных натурных испытаний бортовой аппаратуры космического назначения и установленные в нем унифицированные модули с испытываемой аппаратурой

Унифицированный(ые) модуль(и) содержит систему сенсоров для оценки воздействующих факторов космического пространства на аппаратуру. Система включает средства, обеспечивающие установку в крейт для испытаний в космическом пространстве унифицированного модуля с извлечением после завершения испытания, при этом выносной крейт для испытаний в космическом пространстве обеспечивает размещение по меньшей мере одного унифицированного модуля с испытываемой аппаратурой упомянутых унифицированных служебных блоков, и для каждого унифицированного модуля выделен унифицированный разъем с информационными, управляющими цепями и цепями питания, причем внутренний блок тестовой аппаратуры, располагаемый внутри герметичного отсека космического аппарата, связан электрически и информационно с внешними унифицированными служебными блоками посредством проводного канала

передачи данных. Средства, обеспечивающие установку унифицированного модуля в выносной крейт, представляют собой систему, содержащую функционально робот-манипулятор и бортовой компьютер управления роботом-манипулятором [4]. При работе на МКС в [4] отмечено, что для минимизации внекорабельной деятельности при установке научной аппаратуры (в данном случае испытываемой БА) на внешние рабочие места предусмотрены робототехнические средства: манипулятор ERA, автоматизированная шлюзовая камера (ШК). Унифицированный модуль может быть установлен в выносной крейт либо с использованием робота-манипулятора, либо космонавтом в рамках внекорабельной деятельности. Унифицированный модуль выполнен на основе по меньшей мере одной печатной платы. Унифицированный модуль имеет в своем составе унифицированный разъем для подключения к выносному крейту для испытаний в космическом пространстве и средства фиксации в крейте. Подключение унифицированного модуля осуществляется по технологии Plug and Play. Не используемые в текущий момент части выносного крейта для испытаний в космическом пространстве, предназначенные для размещения унифицированных модулей, защищены от внешних воздействий. Сенсоры для оценки параметров условий внешней окружающей среды связаны через датчиково-преобразующую аппаратуру с вычислительным устройством внутреннего блока тестовой аппаратуры. Внутренний блок тестовой аппаратуры содержит вычислительное устройство, интерфейсы взаимодействия с бортовой телеметрической системой, интерфейсы взаимодействия с бортовой вычислительной машиной и блок питания. Выносной крейт для испытаний в космическом пространстве может быть расположен вне зоны влияния атмосферы космического аппарата, электрически и информационно связан с внутренним блоком тестовой аппаратуры посредством трос-кабеля через гермопереходы внешней поверхности космического аппарата и шарнирно закреплен на внешней поверхности космического аппарата.

Крейт снабжен средствами фиксации унифицированных модулей, а в пространство между унифицированными модулями и между унифицированными модулями и крейтом могут быть помещены и закреплены маты экранно-вакуумной теплоизоляции

для нивелирования влияния теплового режима работы каждого из унифицированных модулей друг на друга [5] (рис. 4).

Кроме того, унификация конструктивных решений позволяет использовать при обязательной предполетной проверке КА унифицированную КПА, что также сокращает финансовые и временные затраты на эти работы. На этапе непосредственного проведения испытаний на борту орбитальной станции становятся доступными ее информационные ресурсы, бортовые средства управления испытаниями и обработки их результатов становятся одинаковыми для разных типов БА.

Последовательность подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры на орбитальной станции

Блок-схема последовательности подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры на орбитальной станции представлена на рис. 5.

Разработку и изготовление унифицированных модулей с испытуемой бортовой аппаратурой осуществляют на Земле с учетом требований унификации посадочных мест в крейте и проводят цикл наземных испытаний.

Затем испытанные унифицированные модули доставляют на орбиту и осуществляют их позиционирование и фиксацию в крейте с помощью манипулятора ERA из шлюзовой камеры [4] или космонавтом в открытом космосе в рамках внекорабельной деятельности.

Выводы

Проведен анализ алгоритмов испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов, предложено осуществлять дополнительные натурные испытания на орбитальной станции до начала летных испытаний, и изложены алгоритм, технология и аппаратная реализация проведения испытаний бортовой аппаратуры в условиях синергетического воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства и флуктуации функциональных



Рис. 5. Блок-схема последовательности подготовки и проведения предварительных натурных испытаний бортовой аппаратуры космического назначения

воздействий (гравитационных и/или магнитных полей Земли, Солнца, Луны, полей мировых техногенных систем наземной и космической связи и навигации, излучения звезд, планет, спутников, космических аппаратов во всех диапазонах), а также внешней электрической нагрузки при функционировании аппаратуры. Подробно показано, что унификация всех этапов подготовки и проведения испытаний сократит требуемые временные и финансовые затраты и обеспечит их доступность для различной БА.

Проведение дополнительных натурных испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на орбитальной станции позволит обеспечить длительную работоспособность бортовой аппаратуры.

Список литературы

1. *Кузнецов В.Д.* Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии, 2014, № 3(6). С. 3–13.
2. *Соловьев А.А., Хохлов А.В., Жалковский Е.А., Березко А.Е., Лебедев А.Ю., Харин Е.П., Шестопалов И.П., Мандеа М., Кузнецов В.Д., Бондарь Т.Н., Нечитайленко В.А., Рыбкина А.И., Пятыгина О.О., Шibaева А.А.* Атлас магнитного поля Земли / Под ред. А. Д. Гвишиани, А. В. Фролова, В. Б. Лапшина // Москва. ГЦ РАН, 2012. 364 с. doi:10.2205/2012Atlas_MPZ.
3. *Снайдер М.* Устройство и методика производства и сборки устройства космического корабля в космосе. Патент РФ 2 732 637. Дата подачи заявки: 2016.08.03.
4. Справочник пользователя РС МКС. <http://www.energia.ru/ru/iss/researches/new-iss-researches.html> (Дата обращения 17.02.2022).
5. *Алексеев С.В., Аксенова И.В., Белокрылова В.В., Иванова Е.Ж., Колесникова Е.М., Харитонова Е.В.* Новая антибликовая экранно-вакуумная тепловая изоляция для космических аппаратов // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина, 2015, № 4 (30). С. 65–69.

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.09.2022
Дата принятия рукописи
в печать 13.01.2023