

УДК 629.78.05

## О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ В СОСТАВЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2013 А. А. Карасёв, И. И. Чупринский

ФГУП «КБ «Арсенал», г. Санкт-Петербург

Рассматриваются вопросы разработки методики испытаний бортовой аппаратуры в составе автоматического космического аппарата. Приводится существенное различие в способе оценки технического состояния объекта исследования при штатной эксплуатации и во время испытаний. Рассматривается способ проверки с использованием паттерна программ, выполняемых из оперативного запоминающего устройства (ПрОЗУ), для модификации штатных бортовых программ управления бортовой аппаратуры с целью повышения её контролепригодности.

*Электрические испытания, проверки, БЦВМ, программное обеспечение, технологические программы, испытательные программы, сообщения.*

Разработка, производство и эксплуатация автоматического космического аппарата (АКА) [1] образуют его жизненный цикл. На завершающей стадии изготовления АКА проводятся комплексные электрические испытания. При проведении их проверяются все системы и агрегаты для оценки возможности перевода АКА с этапа изготовления на этап эксплуатации. Такие же испытания возможны и в дальнейшем на этапе наземной эксплуатации АКА.

Учитывая, что эти испытания занимают достаточно большой временной отрезок этапа изготовления АКА и проверок при наземной эксплуатации, необходимо стремиться к сокращению времени на их проведение и повышению эффективности выполнения этого процесса. Последнее во многом связано с рационализацией разработки и реализации программно-методической документации для выполнения названных работ.

Тема, которой посвящена настоящая статья, связана с практической возможностью усовершенствования этих работ. При этом необходимо в самом общем виде описать объект испытаний и процедуру испытательного процесса АКА, её отличие от процесса управления в полёте.

Современные АКА представляют собой среду взаимодействующих цифро-

вых и аналоговых устройств, где в качестве основной управляющей вычислительной системы используется бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ). Управление бортовой аппаратурой (БА) АКА обеспечивается с использованием модулей сопряжения БА с БЦВМ, в число которых входят каналы передачи данных, в том числе реализующие мультиплексный канал [2], где БЦВМ является контроллером. В процессе управления АКА БЦВМ получает информацию о состоянии БА путём опроса бортовой датчиковой аппаратуры и взаимодействия с БА по каналам информационного обмена, формирует управляющие сигналы и контролирует реакцию на них для выработки в дальнейшем управляющих решений.

При этом БЦВМ выполняет работу по управлению БА в соответствии с комплектом программ, который образует бортовое программное обеспечение (БПО), и является интеллектуальным ядром управления АКА [3].

При разработке бортового программного обеспечения (БПО) разработчик редко заботится об обеспечении контролепригодности его для проведения электрических испытаний (проверок) АКА с использованием средств, входящих в состав испытательного (проверочного) оборудования.

В большинстве случаев его представление об обеспечении контролепригодности БПО и управляемой с его помощью системы связано со знаниями о возможности определять корректность их работы при целевой эксплуатации АКА. При этом им учитывается, что средства контроля в этом случае не всегда обеспечивают возможность оперативно определять корректность работы БПО и управляемой им системы. Например, при эксплуатации АКА доступность средств контроля работы его систем связана с тем, что зоны радиовидимости АКА с наземного измерительного пункта (НИП) почти всегда зависят от пространственного расположения АКА по отношению к НИП. Кроме того, поскольку эти средства, как правило, принадлежат нескольким космическим системам, то для использования их необходимо оформить предварительный заказ. А при наличии такого заказа требуется обеспечить работу с ними в выделенное на использование для контроля время.

Исходя из этих ограничений, анализ состояния АКА при штатной эксплуатации может вестись только в режиме постобработки отчётной информации. Такой метод требует накопления данных о функционировании аппаратуры в запоминающем устройстве системы телеметрических измерений и в специальных областях памяти оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) БЦВМ и предоставления определённых процедур для доступа к этим данным.

В отличие от этого любая процедура комплексных электрических испытаний

связана с контролем изменения текущего состояния АКА в фазовом пространстве его состояния по заранее разработанной программе. Для этого используются опрос датчиковой аппаратуры и получение информации формируемой БА АКА, которая поступает в БЦВМ по линиям передачи данных.

Конечно, при испытаниях также можно придерживаться подхода, связанного с постобработкой отчётной информации. Но такой метод связан с потерей времени для запоминания получаемой при функционировании АКА информации на бортовые накопители без анализа её, поскольку после этого можно воспроизводить её для последующего анализа. Кроме этого, важно отметить, что анализ накопленной информации средствами автоматизированных испытательных комплексов (АИК) в настоящий момент реализован не всегда. Этот недостаток проявляет себя в полной мере, когда число испытательных процедур в испытательной программе (ИП) очень велико

Таким образом, во время электрических испытаний желательно обеспечить получение отчётной информации о состоянии бортовой аппаратуры с минимальными задержками. Кроме того, состав такой информации должен быть достаточен для достоверной оценки текущего технического состояния проверяемой аппаратуры.

Предложенный подход к реализации испытательного процесса принято характеризовать как режим контроля в реальном времени.



Рис. 1. Передача данных по инициативе АИК

На рис. 1 показано, что в составе АИК испытуемого АКА имеется канал связи комплекса с БЦВМ, по которому можно считывать в АИК любой участок с информацией из ОЗУ БЦВМ по инициативе АИК или БПО для его запоминания и последующего анализа. Именно этот канал в большинстве случаев используется испытателем для оперативного получения в процессе испытаний контрольной информации о работе БПО.

Недостаток такого способа получения информации по инициативе АИК заключается в том, что БЦВМ должна "откликаться" на запросы АИК, прерывая выполнение штатной работы программы. В связи с этим, очевидно, существует ограничение на частоту обращения АИК к БЦВМ по этому каналу, в особенности, если загрузка БЦВМ вычислительным процессом очень высока. Кроме того, сформулировать такое ограничение к частоте этих обращений и к их реализации очень трудно, т.к. АИК тоже обычно имеет ограничения по времени и по последовательности процедур в процессе выполнения своих испытательных задач.

Учитывая последнее, для исключения этих недостатков запроса контрольной информации АИКом, при проведении электрических испытаний АКА с БЦВМ предлагается на этапе разработки БПО формировать программы таким образом, чтобы исключить при этом запросы на выдачу этой контрольной информации со стороны АИК.

Для реализации этого необходимо на этапе разработки программ БПО предусмотреть в них процедуры для передачи контрольной информации в АИК по ходу испытаний АКА, используя упомянутый выше канал. Необходимость передачи такой информации в АИК должна определяться БПО по состоянию записанного в ОЗУ БЦВМ признака, формирование которого выполняется по каналу обмена информацией АИК с БЦВМ перед запуском бортовых программ на исполнение или с использованием схмотехнических устройств. Например, таким признаком

может служить установка в требуемое состояние технологического канала модуля индикатора БЦВМ по технологической команде управления из АИК или перемычка (отсутствие перемычки) в кабеле схемы испытаний изделия.

После выдачи контрольной информации бортовая программа должна продолжить своё выполнение с того момента, где она была прервана на выдачу этой информации. При отсутствии признака о необходимости выдачи контрольной информации в АИК штатное выполнение программы не должно прерываться.

Естественно, что такая технологическая процедура по выдаче контрольной информации не должна влиять на выполнение операций программы по управлению бортовой аппаратурой изделия и не «отвлекать» надолго БЦВМ от выполнения целевой функции. Поэтому в большинстве случаев представляется целесообразным обеспечить с её помощью только сообщение в АИК факта выполнения бортовой программой какой-то фазы вычислительного процесса. В связи с этим принято называть такое сообщение меткой трасы (МТ) выполнения бортовой программы.

Необходимость наличия таких МТ должна определяться автором программы совместно с испытателем на этапе разработки БПО. Под испытателем в данном случае понимается разработчик ИП, которые загружаются в АИК для автоматизированных испытаний АКА.

Естественно, что для выдачи МТ в программе должен быть обеспечен, на этапе испытаний АКА, безусловный уход по заданному предварительно АИКом признаку в ветвь, которая производит выдачу МТ и последующее возвращение в бортовую программу для штатного выполнения управляющих (вычислительных) процедур.

Следует также отметить, что если бортовая программа "прошивается" в постоянном запоминающемся устройстве (ПЗУ) БЦВМ, то на входе и выходе любого из модулей такой программы обычно

имеются ветвления на выход в ОЗУ БЦВМ по заданному оператором признаку. (Под «оператором» в этом случае понимается программа управления АКА при испытании (проверке) АКА или при его целевой эксплуатации.) Эти ветвления должны использоваться для того, чтобы

обеспечить возможность изменения участка программы, выполняемой этим модулем, в случае отказов в ПЗУ или при необходимости модернизации названного участка бортовой программы при целевой эксплуатации АКА (рис.2).



Рис. 2. Передача данных из ПрОЗУ

При разработке ИП для проверок бортовой аппаратуры обычно используется паттерн ПрОЗУ [3], который заключается в использовании специальных технологических программ БЦВМ, которые встраиваются в общий вычислительный процесс и размещаются в ОЗУ. При этом уделяется пристальное внимание тем ограничениям, о которых упоминалось выше.

Испытательные ПрОЗУ загружаются в ОЗУ БЦВМ по команде из ИП по мультиплексному каналу связи АИК <-> БЦВМ и далее запускаются на исполнение из ИП или из бортовой программы при наличии в ОЗУ БЦВМ соответствующего признака.

При управлении БА с использованием БЦВМ генерируются изменения координат, соответствующих текущему состоянию АКА в фазовом пространстве его состояний. Подразумевается, что информация о текущем состоянии АКА может быть сформирована при этом в виде МТ испытательными ПрОЗУ и передана ими в АИК для анализа.

Понятно, что структура МТ должна предполагать наличие в ней признака, определяющего фазу вычислительного процесса, на которой она была сформирована бортовой программой. Поэтому

АИК, получив МТ, может всегда определить принадлежность её к фазе исполнения бортовой программы и выполнить предписанное ей в ИП соответствующее действие.

В этом случае, когда активные действия со стороны АИК по изменению выполнения штатной работы бортовой программы не предусматриваются, результаты анализа МТ обычно используются в ИП для выполнения следующих универсальных операций:

- синхронного запуска на исполнение специальных ИП для обеспечения контроля работы оборудования (включения его в различные режимы работы) испытательного комплекса;
- организации запуска АИКом на исполнение бортовых ПрОЗУ, которые обеспечивают выполнение испытательных операций;
- автоматического контроля выработки ресурса бортовой аппаратурой;
- информирования оператора АИК о ходе выполнения вычислительного процесса путём вывода на центральный пульт оператора (ЦПУ) АИК соответствующей текстовой информации;
- информирования оператора АИК о формировании бортовой аппаратурой

сигналов об отказах или о нарушении протоколов взаимодействия с БЦВМ;

- запоминания времени получения МТ с целью формирования отчётного протокола, создаваемого в процессе испытаний для последующего автоматического анализа ИП работы БПО;

- и других.

При разработке БПО и испытательных программ для АИКа можно интерпретировать функционирование бортовой аппаратуры как некоторый автомат. Изначально можно предположить, что все переходы этого автомата фиксируются в БПО и передаются по каналу связи в АИК в виде МТ. Однако на практике от использования такой модели необходимо отходить и специально «прореживать» сообщения БПО. Это обстоятельство объясняется тем, что производительность канала связи и обработчика сообщений может быть мала для поступающего количества сообщений. В действительности эта ситуация хорошо знакома из теории систем массового обслуживания [4], когда интенсивность потока внешних событий, поступающих на вход системы, выше производительности канала обслуживания.

Эту ситуацию можно «исправить», только организовав «бесконечную» очередь сообщений, что невозможно сделать ввиду недостатков модели системы исполнения программ испытаний [5], либо снизив интенсивность потока сообщений. Поэтому при разработке методики испытаний АКА всегда будет актуальным вопрос выбора числа сообщений (иначе-МТ) и разнесения по времени моментов их поступления в АИК.

Предложенный метод был использован в ФГУП «КБ Арсенал» при разработке испытательных программ для проверки работы целевой аппаратуры КА дистанционного зондирования Земли на этапе проверочных включений этой аппаратуры. Использование такой организации ИП позволило в значительной мере сократить трудоёмкость разработки испытательного программного обеспечения.

Достигалось это тем, что в планирующей ИП по проверке любого из режимов целевой аппаратуры основное место занимал универсальный участок (блок) по циклическому слежению за поступлением в АИК МТ, сформированных БПО с использованием ПрОЗУ, начиная с включения проверяемого режима работы.

Таким образом, во всём спектре планирующих ИП, а их число превышало 50, использовались универсальные блоки, которые встраивались в середину ИП. Начальная часть ИП использовалась для организации работы целевой аппаратуры для включения её в проверяемый режим, а завершающая - для анализа корректности выполнения сформированного режима работы и автоматического принятия решения о соответствии (несоответствии) его реализации заданным требованиям.

#### Библиографический список

1. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения [Текст] /— М.: Изд-во стандартов, 2011. – 32 с.
2. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 22 с.
3. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии [Текст] / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.В. Соллогуб [и др.] – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.
4. Вентцель, Е.С. Исследование операций [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
5. Карасёв, А.А. Проблема разработки испытательного программного обеспечения для новых бортовых комплексов дистанционного зондирования Земли в составе автоматического космического аппарата [Текст] / А.А. Карасёв // Итоги диссертационных исследований. Т. 3. – Матер. IV Всеросс. конкурса молодых ученых. – М.:РАН, 2012. – С.3-10.

## **DEVELOPING METHODS FOR ELECTRICAL TESTS OF ONBOARD DEVICES INCORPORATED IN SPACECRAFT**

© 2013 A. A. Karasev, I. I. Chuprinskiy

Federal State Unitary Enterprise “KB Arsenal”, Saint-Petersburg

The paper deals with the development of methods of testing onboard equipment incorporated in automatic spacecraft. Considerable difference in methods of assessing the technical state of the object under investigation in normal operation during the tests is shown. A way of testing using the pattern for the modification of onboard equipment control programmes with the aim of increasing its controllability is discussed.

*Electrical test, tests, on-board computer, software, technology programmes, test software, messages.*

### **Информация об авторах**

**Карасёв Александр Александрович**, начальник сектора, ФГУП «КБ “Арсенал”», г. Санкт-Петербург. E-mail: [kbarsenal@peterlink.ru](mailto:kbarsenal@peterlink.ru). Область научных интересов: электрические испытания КА, языки испытаний, программное обеспечение систем реального времени.

**Чупринский Игорь Иосифович**, начальник группы, ФГУП «КБ “Арсенал”», г. Санкт-Петербург. E-mail: [kbarsenal@peterlink.ru](mailto:kbarsenal@peterlink.ru). Область научных интересов: электрические испытания КА, автоматизация испытаний, испытательное программное обеспечение.

**Karasev Aleksandr Aleksandrovich**, head of sector, Design Bureau «KB “Arsenal”». E-mail: [kbarsenal@peterlink.ru](mailto:kbarsenal@peterlink.ru). Area of research: spacecraft electrical tests, real-time software, problem-oriented programming languages.

**Chuprinskiy Igor Iosifovich**, team chief, Design Bureau «KB “Arsenal”». E-mail: [kbarsenal@peterlink.ru](mailto:kbarsenal@peterlink.ru). Area of research: spacecraft electrical tests, test software, test methods.