

УТОЧНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «АИСТ» НА ОСНОВЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2018

С. С. Волгин аспирант кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; nku-mka@yandex.ru

В. В. Салмин доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sputnik@ssau.ru

С. И. Ткаченко доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; sitkach@mail.ru

И. С. Ткаченко кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; innovatore@mail.ru

М. А. Иванушкин аспирант кафедры космического машиностроения; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; nku-mka@yandex.ru

Рассматриваются вопросы использования телеметрической информации, а именно данных о нештатных ситуациях, отказах и сбоях, возникающих на борту малых космических аппаратов «АИСТ», для уточнения стандартных алгоритмов восстановления работоспособного состояния аппаратов. С этой целью проведён анализ накопленного объёма телеметрической информации, состоящий из двух этапов: поиска выходящих за пределы допустимых значений параметров и установления причин возникновения нештатных ситуаций. Изучение причин и последствий нештатных ситуаций позволило создать два дерева отказов, отражающих пути распространения отказов и сбоев в бортовом оборудовании космического аппарата и облегчающих анализ возможных нештатных ситуаций. Использование деревьев отказов и информации о нештатных ситуациях позволило провести уточнение алгоритмов восстановления работоспособного состояния, разработанных на этапе проектирования малых космических аппаратов «АИСТ». Приведены два примера уточнённых алгоритмов, позволивших восстановить работоспособное состояние малых космических аппаратов после возникновения отказов в бортовой аппаратуре.

Малый космический аппарат; восстановление работоспособного состояния; уточнение алгоритмов; телеметрическая информация; нештатная ситуация; дерево отказов; целевые показатели эффективности.

Цитирование: Волгин С.С., Салмин В.В., [Ткаченко С.И.](#), Ткаченко И.С., Иванушкин М.А. Уточнение алгоритмов восстановления работоспособного состояния малых космических аппаратов «АИСТ» на основе телеметрической информации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 3. С. 36-43. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-36-43

Введение

В связи с усложнением задач, решаемых космическими аппаратами, увеличением сроков их активного существования, внедрением новых технологий, позволяющих создавать маломассогабаритные конструкции, малым космическим аппаратам (МКА) – космическим лабораториям – уделяется всё больше внимания как разработчиками космической техники, так и исследователями космического пространства.

Одним из примеров таких космических аппаратов являются МКА «АИСТ» совместной разработки АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) и Самарского университета.

Обеспечение живучести космических аппаратов (КА) обычно связывается с повышением надёжности работы их бортовых систем. Однако такой подход эффективен при соблюдении штатных условий эксплуатации КА. Опыт показывает, что в процессе эксплуатации на борту возникают разнообразные нештатные ситуации. Для их устранения необходимо предусматривать комплекс специальных систем и мероприятий, которые в совокупности образуют систему управления живучестью КА.

Живучесть как свойство КА поддерживать в заданных пределах (в течение всего срока активного существования КА) основные целевые показатели эффективности (ЦПЭ) необходимо реализовывать как на стадии проектирования, так и в процессе лётно-конструкторских испытаний и штатной эксплуатации [1].

МКА для научных экспериментов, такие как МКА «АИСТ», обладают шестью основными целевыми показателями эффективности: время работы научной аппаратуры (НА) – $T_{НА}$, периодичность контроля испытываемых систем – $P_{ИС}$, количество контролируемых параметров КА – $N_{КП}$, оперативность доставки информации потребителю – $K_{нотр}$, периодичность включения НА – $Q_{НА}$, время активного функционирования – T_f .

При возникновении нештатных ситуаций на борту поддержание каждого из вышеприведённых показателей является важной задачей для службы эксплуатации МКА. Однако, при выявлении отказа или сбоя все действия по возвращению аппарата к штатному состоянию направлены, в первую очередь, на поддержание главного показателя – времени активного функционирования.

Для удобства приведём значения некоторых терминов, используемых в работе:

– работоспособность – это состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданную функцию с параметрами, установленными требованиями технической документации;

– работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

– нештатная ситуация (НС) – ситуация, при которой параметры, характеризующие работоспособность аппаратуры, отклоняются от номинальных значений за пределы пороговых значений;

– отказ – нарушение работоспособности;

– сбой – кратковременная самоустраняющаяся утрата техническим объектом работоспособности.

Основными задачами настоящей работы являются проведение анализа влияния факторов космического пространства на бортовую аппаратуру (БА) МКА «АИСТ» и уточнение алгоритмов восстановления работоспособного состояния аппарата после возникновения отказов.

Анализ телеметрической информации МКА «АИСТ»

Телеметрическая информация (ТМИ), поступающая с борта МКА «АИСТ» и накапливаемая в течение эксплуатации, служит основным источником знаний о состоянии бортовых систем МКА, а её анализ позволяет судить в каком режиме и при каких условиях (внешних или внутренних) происходит работа бортовой аппаратуры.

Записываемая аппаратурой ДОКА-Б телеметрическая информация содержит 128 параметров о состоянии МКА «АИСТ». Анализ получаемой ТМИ позволяет опреде-

лить причину возникновения нештатных ситуаций и разработать наиболее эффективные способы восстановления работоспособного состояния МКА.

Процедура анализа состоит из двух этапов. На первом этапе проводится поиск выходящих за пределы допустимых значений параметров, выбранных в качестве основных индикаторов НС на борту МКА «АИСТ». В табл. 1 приведён список этих параметров и диапазоны допустимых значений.

Таблица 1. Список анализируемых параметров

Имя параметра	Короткое имя	Единица измерения	Диапазон допустимых значений
Напряжение бортовой сети	Ubs	В	10.0...15.5
Ток бортовой сети	lbs	А	0.0...6.0
Ток солнечной батареи	Isun	А	0.0...6.0
Режимы контроллера питания и телеметрии	RKPT	bit	xxxx0x0x
Ток приёмного устройства	Ipt0	А	0.0...3.0
Ток передатчика №1	Ipt1	А	0.0...3.0
Ток передатчика №2	Ipt2	А	0.0...3.0
Ток навигационной аппаратуры пользователя	Ipt3	А	0.0...3.0
Ток генератора бортового времени	Ipt4	А	0.0...3.0
Ток научной аппаратуры МАГКОМ (основная шина питания)	Ipt6	А	0.0...3.0
Ток научной аппаратуры МАГКОМ (резервная шина питания)	Ipt7	А	0.0...3.0
Температурный датчик 1 – 16	TR1-16	°С	– 40.0 ... + 60.0
Режимы управления	TmUpr	bit	xx00xx00

На втором этапе происходит выявление НС с однотипным поведением отслеживаемых параметров и определение причин их возникновения с использованием технической документации на МКА.

В процессе анализа массива ТМИ было выявлено три основных типа отказов, приводящих к возникновению НС:

- из-за недостаточного восполнения энергетических запасов;
- некорректной работы научной аппаратуры;
- воздействия тяжелозаряженных частиц (ТЗЧ).

Как можно видеть из круговой диаграммы (рис. 1), наибольшее количество отказов возникает в результате воздействия на бортовую аппаратуру ТЗЧ. Данные события являются критичными, так как могут послужить причиной выхода из строя основных систем и МКА в целом. Их невозможно предупредить, а вернуть МКА в работоспособное состояние возможно только за счёт внутренних резервов или внешнего вмешательства с помощью наземного комплекса управления (НКУ) [2].

Далее идут отказы по причине деградации аккумуляторной батареи (АКБ). Они являются не критичными, так как на борту имеется защита от опасного разряда АКБ, принудительно отключающая БА, которая не участвует в поддержании работоспособности основных систем МКА, оставляя включёнными только блок центрального контроллера и телеметрии (БЦКТ), а также контроллер питания и телеметрии (КПТ). Однако подобные отказы могут приводить к остановке работы научной аппаратуры и, как следствие, нарушать программу проведения исследований.

Отказы МКА вследствие сбоев в работе НА занимают небольшую долю от общего количества, причина их возникновения лежит в проектной недоработке научной аппаратуры. Наиболее частым отказом такого типа является невозможность прекращения работы НА по командам из НКУ и, как следствие, возникновение неконтролируемого расхода заряда АКБ.

Таким образом, наиболее уязвимыми местами МКА являются аккумуляторная батарея и электроника, чувствительная к воздействию ТЗЧ.



Рис. 1. Круговая диаграмма природы отказов для двух МКА «АИСТ»

Разработка дерева отказов

В результате проведенного анализа НС на борту МКА «АИСТ» и установления причинно-следственных связей между ними и вызывающими их факторами становится возможным построение дерева отказов (ДО), отражающее опасные факторы космического пространства и последствия их воздействия на БА.

На рис. 2 представлено дерево отказов МКА «АИСТ», состоящее из следующих видов воздействия: «Воздействие ТЗЧ», «Перегрев» и «Переохлаждение», которые соединены стрелками (логическими связями) с системами МКА. Отказы и сбои, находящиеся в верхней части ДО, являются следствием воздействия различных факторов космического пространства на БА МКА. Логические элементы «ИЛИ» говорят о том, что одно и то же внешнее воздействие на систему МКА при различной интенсивности может приводить к отказам (сбоям) разного типа.

Из ДО (рис. 2) следует, что самой чувствительной системой МКА является КУНС. Воздействие на неё факторов космического пространства наиболее часто (по сравнению с другими системами МКА) приводит к отказам, вплоть до прекращения функционирования МКА. Это происходит из-за того, что в состав КУНС входит БА, созданная с использованием интегральных микросхем (ИМС), отвечающая за контроль состояния систем МКА, управление НА, осуществление сеансов связи и распределение питания. ИМС являются «узким местом» в обеспечении работоспособности МКА, так как наиболее чувствительны к перепадам температур и воздействию ТЗЧ.

Для наглядного представления возникновения и развития НС в системе КУНС составлено дерево отказов, представленное на рис. 3.

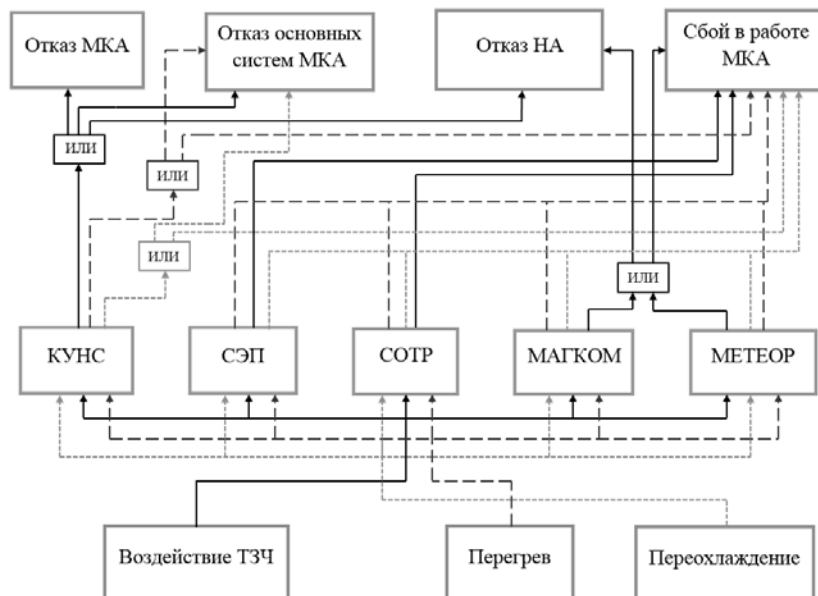


Рис. 2. Дерево отказов МКА «АИСТ»:
 КУНС – командно-управляющая навигационная система;
 СЭП – система электропитания; СОТР – система обеспечения теплового режима;
 МАГКОМ, МЕТЕОР – научная аппаратура

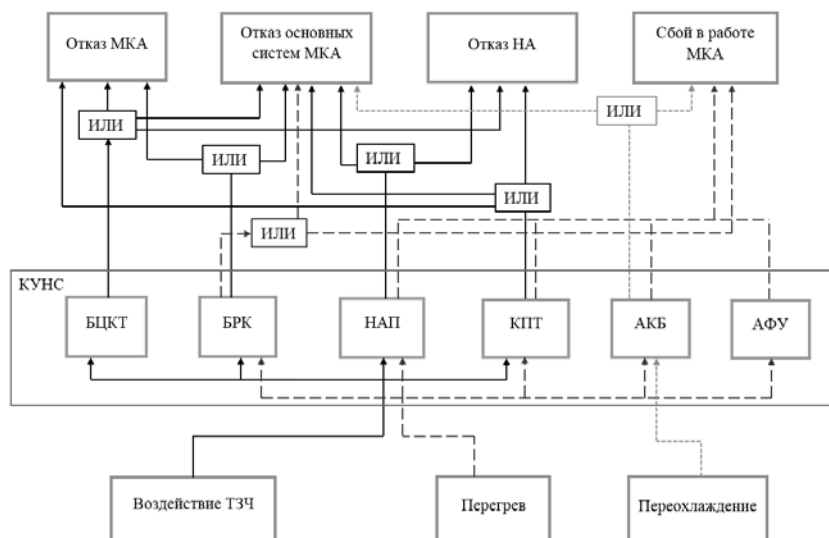


Рис. 3. Дерево отказов командно-управляющей навигационной системы:
 БРК – блок радиоканалов; НАП – навигационная аппаратура пользователя;
 АФУ – антенно-фидерное устройство

Составленные ДО (рис. 2, 3) позволяют оперативно проводить анализ причин отказов и сбоев, а также способствуют принятию наиболее эффективных решений для локализации и устранения угрозы выхода МКА из строя [3].

Помимо применения ДО как средства поддержания работоспособного состояния МКА, с теми же целями возможно использовать информацию о НС, содержащуюся в ТМИ.

Уточнение алгоритмов восстановления работоспособного состояния МКА

Регулярно проводимый анализ работоспособности БА МКА «АИСТ» с использованием ТМИ и ДО позволяет проводить уточнение алгоритмов выхода из НС, созданных разработчиком БА. Приведём два примера.

Первым примером такого уточнения является дополненный алгоритм действий оператора НКУ при возникновении отказа модуля работы с цифровыми датчиками температуры. Первоначальная последовательность действий, заключающаяся в переключении с повреждённого на исправный полукомплект БЦКТ, была дополнена процедурой последовательного переключения дублированных шин информационного обмена (CAN-2В) для полукомплектов КПП. Необходимость уточнения первоначального алгоритма появилась ввиду того, что 15.10.2015 г. резервный полукомплект БЦКТ МКА «АИСТ» был повреждён воздействием ТЗЧ и утратил возможность штатного функционирования, а стандартные процедуры восстановления работоспособного состояния модуля не дали результатов. Поэтому, основываясь на информации о работоспособности БЦКТ, полученной из ТМИ, и логической схеме устройства БА МКА «АИСТ», было принято решение дополнить существующий алгоритм процедурой переключения полукомплектов КПП и шин информационного обмена CAN-2В. Использование уточнённого алгоритма позволило восстановить информационные связи между узлом, отвечающим за опрос и сохранение информации с цифровых датчиков температуры, расположенных на БА МКА, и блоком центрального контроллера, отвечающим за передачу сохранённых данных на Землю.

Вторым примером является алгоритм восстановления работоспособного состояния МКА при возникновении отказа блока радиоканалов (БРК), отвечающего за приём и передачу информации по каналам радиосвязи. Отказ БРК, произошедший 09.08.2018 г. вследствие воздействия ТЗЧ, сделал невозможным приём МКА «АИСТ» команд управления на зарезервированных для этого частотах. Стандартный алгоритм, предусматривающий выдачу команд управления для последовательного переключения между двумя основными частотами приёма на борту МКА, не восстановил работоспособное состояние аппарата. Основываясь на ТМИ, полученной за предыдущие сутки и ДО, связывающим отказ МКА с воздействием ТЗЧ на БРК, было принято решение о переводе МКА на работу с резервным набором частот приёма и передачи, а также о перенастройке радиооборудования НКУ для работы с ними. Данный алгоритм позволил вернуть МКА «АИСТ» в работоспособное состояние и восстановить информационный обмен космического аппарата с НКУ.

Всего в процессе работы было проведено уточнение 11 стандартных алгоритмов, а применение четырёх из них позволило восстановить работоспособное состояние МКА «АИСТ» после отказов основных систем. Таким образом, информацию о НС возможно успешно применять для уточнения алгоритмов восстановления работоспособного состояния космического аппарата после отказов.

Заключение

В результате проведённого исследования был выполнен анализ нештатных ситуаций МКА «АИСТ», что позволило получить данные о природе отказов и сбоев, влиянии факторов космического пространства на бортовую аппаратуру и определить наиболее уязвимые системы МКА.

Накопленные данные о характере функционирования БА МКА «АИСТ» под влиянием факторов космического пространства позволили выявить закономерности в нештатных ситуациях, на основе которых были разработаны два дерева отказов и уточнены 11 стандартных алгоритмов восстановления работоспособности МКА.

Штатное функционирование обоих МКА «АИСТ» на протяжении двух лет после окончания заявленного производителем срока активного существования подтверждает эффективность процедур, созданных на основе проведённого анализа.

Библиографический список

1. Ахметов Р.Н. Управление живучестью космических аппаратов // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2006. № 9. С. 16-20.
2. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Проблемы обеспечения сбое- и отказоустойчивости бортовой аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли от воздействия излучений космического пространства // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 72-78.
3. Надёжность технических систем и техногенный риск. <http://www.obzh.ru/nad/6-8.html>.

REFINEMENT OF OPERABLE STATE RECOVERY ALGORITHMS FOR “AIST” SMALL SATELLITES ON THE BASIS OF TELEMETRIC INFORMATION

© 2018

S. S. Volgin Postgraduate Student, Department of Space Engineering;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
nku-mka@yandex.ru

V. V. Salmin Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Head of the Department
of Space Engineering;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
sputnik@ssau.ru

S. I. Tkachenko Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Space Engineering;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
sitkach@mail.ru

I. S. Tkachenko Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor, Department of Space
Engineering;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
innovatore@mail.ru

M. A. Ivanushkin Postgraduate Student, Department of Space Engineering;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
nku-mka@yandex.ru

The article deals with the use of telemetric information, namely data on emergencies, failures and malfunctions occurring on AIST small satellites. These data are used for the refinement of standard algorithms of satellite operable state recovery. To this end, an analysis was made of the accumulated volume of telemetric information, consisting of two stages: searching for parameters exceeding the acceptable limits and establishing the causes of emergencies. A detailed study of the causes and consequences of emergencies made it possible to create two fault trees reflecting the ways of the propagation of failures in the small satellite onboard equipment. The use of fault trees and information on emergencies made it possible to refine the algorithms for the operable state recovery developed at the stage of designing AIST small satellites. Two examples of refined algorithms allowing the recovery of the operable state of small satellites after failure of on-board equipment are given in the article.

Small satellite; operable state recovery; refinement of algorithms; telemetric information; emergency situation; fault tree; target performance indicators.

Citation: Volgin S.S., Salmin V.V., [Tkachenko S.I.](#), Tkachenko I.S., Ivanushkin M.A. Refinement of operable state recovery algorithms for “AIST” small satellites on the basis of telemetric information. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 3. P. 36-43. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-36-43

References

1. Akhmetov R.N. Controlling the survivability of spacecraft. *Polyot. All-Russian Scientific-Technical Journal*. 2006. No. 9. P. 16-20. (In Russ.)
2. Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V. Maintaining of fault-tolerant and fail-safe behavior of remote sensing satellite onboard equipment to withstand impact of space charged particles. *Mechatronics, Automation, Control*. 2009. No. 11. P. 72-78. (In Russ.)
3. *Nadezhnost' tekhnicheskikh system i tekhnogennyy risk* [Reliability of technical systems. Technology-related risk]. Available at: <http://www.obzh.ru/nad/6-8.html>. (accessed 17.09.2018)