

УДК 531.383 : 629.78

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИВУЧЕСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2008 Р.Н. Ахметов

ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс», г. Самара

Рассматриваются методы выявления аномального функционирования бортовых средств автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) в реальном масштабе времени, предотвращения развития аномальных ситуаций (АС) до необратимых последствий, автоматической диагностики отказов бортовых систем и их реанимации. Приводятся результаты автономного анализа, диагностики и последующей реконфигурации контура управления ориентацией космического аппарата.

*Автоматические КА ДЗЗ, аномальная ситуация, эталонная модель, отказы бортовых систем, автономный анализ, диагностика, реанимация, критерии Вальда*

### Введение

Целевая эффективность автоматических КА ДЗЗ во многом определяется эффективностью и качеством процессов управления функционированием его бортовых систем (БС) как в штатных условиях, так и в аномальных (нештатных) ситуациях. Последнее тесно связано со свойством отказоустойчивости.

Обеспечение отказоустойчивости любых автоматических средств, особенно при функционировании их в условиях отсутствия доступа для квалифицированного обслуживания, в частности, в условиях космического полёта, представляет собой актуальную проблему. Отказ аппаратуры в автоматической системе принципиально изменяет её структуру, может привести к возникновению и развитию аварийной ситуации. Для предотвращения катастрофического поведения системы следует предусматривать меры оперативного реагирования, обеспечивающие безопасность функционирования системы, а также её последующие диагностику и реанимацию, т.е. мероприятия по восстановлению штатных функций. В данном контексте отказоустойчивость (в отличие от безотказности системы, тесно связанной с понятием надёжности) близка, по сути, к понятию живучести системы, поскольку отказ в системе оказывается событием допустимым, а его негативное влияние может быть скомпенсировано посредством реконфигурации системы.

Такие функции на борту автоматических КА выполняются, как правило, бортовым комплексом управления (БКУ) с активным использованием встроенных в системы контрольно-диагностических средств.

В статье рассмотрены подходы к автономному управлению живучестью БС с помощью бортовых средств КА, методы и критерии диагностирования их состояния и управления внутренними ресурсами, методы принятия решения о наличии отказов и практические приёмы блокирования развития АС путём реконфигурации систем. Приводятся результаты динамического анализа системы управления ориентацией (СУО) КА в процессе зондирования Земли из космоса.

### 1. Постановка задачи

Современные КА для низкоорбитального зондирования поверхности Земли из космоса (типа «Ресурс-ДК1») оснащаются множеством автоматических систем (целевая аппаратура; системы энергопитания, обеспечения теплового режима, управления ориентацией, маневрирования на орбите, навигации и др.). Их совместная работа определяется режимами (паттернами) или схемами функционирования. Фрагмент одного из возможных типовых паттернов угловых движений КА ДЗЗ в сеансе наблюдения произвольно расположенной совокупности объектов показан на рис. 1.

Управление полётом КА осуществляется автоматизированной системой управления

(АСУ КА), которая традиционно реализуется в виде двух комплексов: бортового (БКУ) и наземного (НКУ) комплексов управления,

связанных между собой командной радиолинией управления и радиолинией телеметрической системы.



Рис. 1. Фрагмент типового паттерна угловых движений КА ДЗЗ в сеансе наблюдения произвольно расположенной совокупности объектов

При этом БКУ современных КА ДЗЗ в соответствии с планами-заданиями от НКУ автономно на основе текущей навигационной информации формирует временную диаграмму (циклограмму) работы БС в обеспечение их штатного целевого функционирования в нормированных (штатных) условиях.

Задача состоит в том, чтобы при возникновении аномальных (нештатных) ситуаций, связанных, в частности, со сбоями и отказами БС, с помощью штатных бортовых аппаратно-программных средств оперативно восстановить работоспособность отказавшей системы, обеспечив тем самым возможность использования КА по целевому назначению. При этом в ряде случаев допускается выполнение частных задач с пониженными показателями, например, точность выдачи импульса тяги при коррекции орбиты КА или точности его ориентации.

Известны пути достижения отказоустойчивого функционирования сложных технических систем, которые в основном базируются на введении в их состав избыточных структурных элементов (например, дублирование, троирование и поддержание всех элементов в «горячем» резерве). Принятие решений в этих случаях осуществляется по принципу голосования «два из трёх», «три из пяти» и других. Подобным образом, например, решалась задача на космической станции «Скайлэб» и других КА США, что просто и достаточно эффективно. Однако такой подход приемлем не во всех случаях.

Современные КА ДЗЗ, особенно детального наблюдения, требуют применения прецизионных измерителей параметров ориентации и мощных исполнительных органов, что связано с относительно высоким уровнем энергомассовых затрат. Поэтому троирование структурных элементов (да ещё в

режиме их постоянной готовности) в составе одной системы не всегда представляется возможным.

Проблема состоит в том, чтобы выбрать простой и достаточно эффективный путь обеспечения отказоустойчивости автоматических КА, приемлемый для типовых условий функционирования большинства низкоорбитальных КА ДЗЗ.

## 2. Методы решения задач автономного управления живучестью КА ДЗЗ

В [1,2,3] приведено несколько подходов к решению задачи управления живучестью КА. Характерной чертой современного этапа развития космических средств наблюдения является тенденция роста числа и

сложности функций управления живучестью КА, выполняемых автономно БКУ. Укрупнённая структура БКУ для современных КА ДЗЗ с учётом решения задачи автономного функционирования в штатных и аномальных ситуациях представлена на рис. 2.

Основой БКУ является организующая система (ОС), которая обеспечивает требуемую автономность решения штатных задач и управление в аномальных ситуациях. Особенность структуры ОС состоит в том, что все пять её функциональных элементов (подсистем) реализованы в виде совокупностей программ бортовой вычислительной системы (БВС) БКУ.

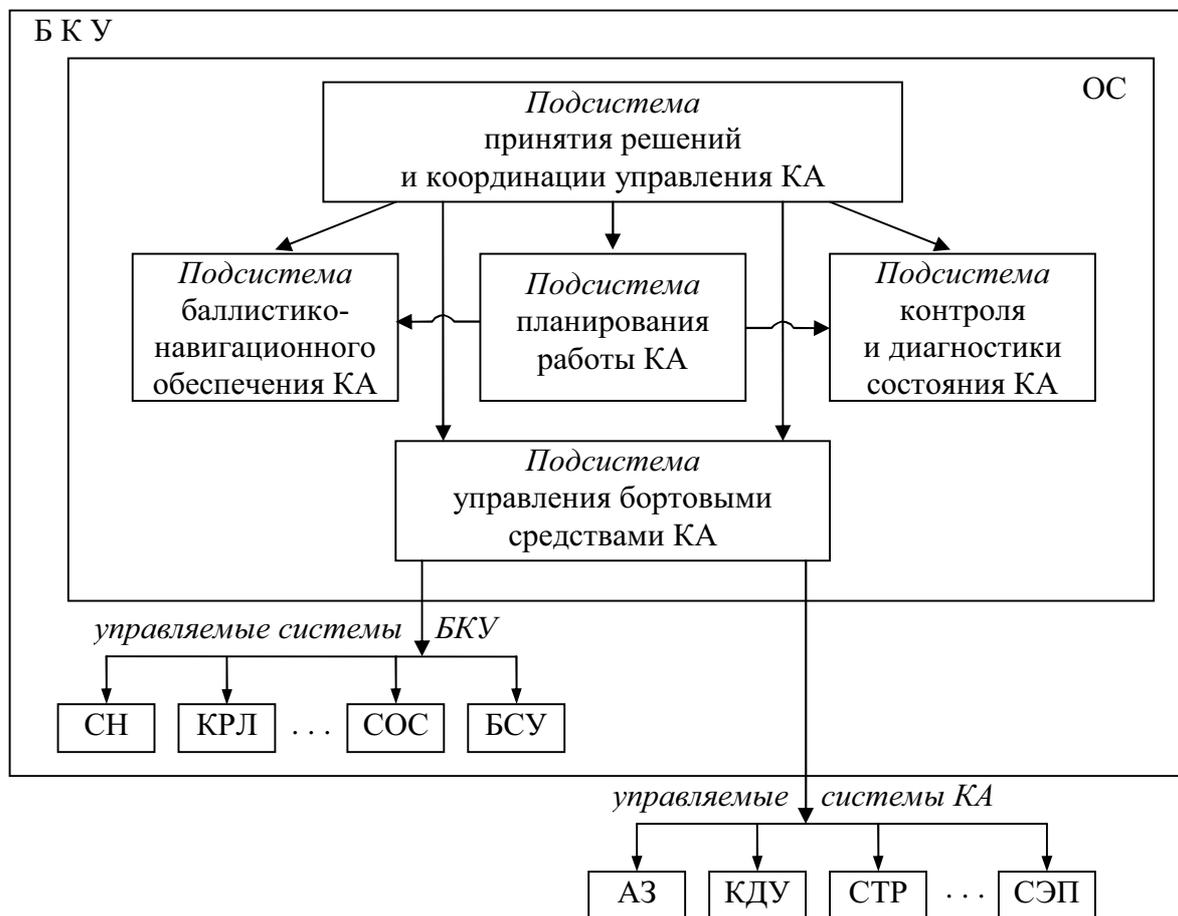


Рис.2. Структура организующей системы БКУ КА ДЗЗ

На рис.2 приняты следующие обозначения: СН – система навигации, КРЛ – командная радиолиния, СОС – система ориентации и стабилизации, БСУ – бортовое синхронизирующее устройство, АЗ – аппаратура зондирования, КДУ – корректирующая дви-

гательная установка, СТР – система терморегулирования, СЭП – система энергоснабжения.

Верхний уровень - подсистема принятия решений и координации управления КА, которая обеспечивает взаимосвязанное функционирование всех подсистем ОС, исходя из текущего состояния КА.

Нижний уровень - подсистема исполнения принятых решений, то есть формирование и выдача команд управления на БС.

Наличие трёх автономных подсистем среднего уровня (бортовое планирование, контрольно-диагностическое и баллистико-навигационное обеспечение) структурно обеспечивает реализацию требуемого уровня автономности полёта КА с сохранением выполнения им целевых задач. Функциональное наполнение этих подсистем характеризует степень интеллектуализации процессов управления БКУ.

Важно отметить, что основную «нагрузку» в задаче управления живучестью несёт подсистема контроля и диагностики состояния КА, которая, по сути, представляет собой верхний иерархический уровень автономной системы управления живучестью (СУЖ) КА и реализована в виде взаимосвязанной совокупности программных модулей в БВС БКУ.

В общем случае целями СУЖ являются:

- контроль правильности текущего процесса функционирования КА и оперативное выявление АС;
- диагностика АС до уровня отказавшей системы или бортовой аппаратуры;
- адекватное реагирование на причины АС, то есть выработка соответствующих управляющих воздействий с целью парирования их деструктивного влияния на бортовые системы КА и его целевое функционирование;
- восстановление штатных функций бортовых систем и КА в целом.

Подходы к достижению поставленных целей могут быть различными. Например, подход на основе повышения уровня надёжности всех структурных элементов КА. Однако он не исключает возможности отказов технических средств даже при высоком уровне их надёжности.

*Метод управления живучестью КА средствами АСУ КА (БКУ и НКУ).* Подход к управлению функционированием КА на основе комплексного использования средств БКУ и НКУ был общепринятым на начальном этапе развития средств зондирования Земли из космоса из-за ограниченности ресурсов БВС. В этом случае на БКУ возлага-

лась в основном функция безопасности работы КА при появлении АС в какой-либо бортовой системе.

Сущность метода состоит в том, что при возникновении АС в бортовой системе она выдаёт «сигнал прерывания» на соответствующий вход БВС [3]. По этому сигналу инициируется специальная программа БВС, которая формирует типовой набор управлений (команд), обеспечивающий прерывание или снятие штатных задач КА с обслуживания, производится отключение электропитания всех бортовых систем, кроме бортовой аппаратуры (БА) КРЛ и БВС, а КА переводится в режим неориентированного полёта или «дрейфа». Далее формируется типовой набор телеметрической информации о состоянии бортовых средств на момент их выключения, который передаётся в НКУ для анализа и принятия решения по восстановлению работоспособности систем КА (полной или частичной). Длительность формирования необходимых управлений по реанимации КА в такой схеме практически всегда измеряется сутками, что в свою очередь приводит к существенной потере производительности КА.

По мере совершенствования бортовой вычислительной техники функции контрольно-диагностической подсистемы БКУ постоянно наращивались за счёт использования интеллектуальных компонентов в алгоритмах обработки информации и управления. В результате сформировался новый метод управления функционированием КА, когда степень автономности бортовых средств по управлению живучестью для современных КА ДЗЗ возросла до 90% [3, 4].

*Метод автономного управления живучестью КА бортовыми средствами.* Этот метод основан на автономном (автоматическом) управлении техническим состоянием БС, что связано с контролем текущего состояния, диагностикой отказов и управлением их внутренними ресурсами.

Декомпозиция целей и задач управления живучестью КА ДЗЗ представлена на рис. 3.

Управление живучестью КА базируется на следующих принципах:

- сохранение параметров текущих бортовых процессов при отказах систем КА на определённых (ограниченных) интервалах времени;
- максимально возможная оперативность выявления в системах АС и их диагностики;
- обеспечение достоверности (на уровне заданной) диагностики АС для выработки управляющих воздействий на системы, работа которых привела к АС;
- предпочтительное использование внутренних структурных резервов бортовых систем при восстановлении их работоспособности, как наиболее полно сохраняющего целевые показатели КА, а также обеспечивающего минимизацию потерь времени на восстановление работоспособности КА;
- возможность изменения штатной программы работы КА на время реконфигурации систем при исчерпании их структурных резервов;
- организация управления живучестью КА по иерархическому принципу: нижний уровень - БА, далее подсистемы (включая подсистемы БКУ), системы КА (включая БКУ) и, наконец, НКУ;
- обеспечение сохранности информации, на основе которой определяются варианты реконфигурации систем (в том числе БКУ), их подсистем, а также БА;
- формирование диагностической информации, передаваемой для персонала НКУ, с учетом данных о предыстории отказа, позволяющих оценить ретроспективу его развития.



Рис.3. Схема декомпозиции целей и задач управления живучестью КА ДЗЗ

На рис. 3 принято:  $T_{об}$ ,  $T_p$ ,  $T_{пт}$  – соответственно критерии длительности обнаружения АС, восстановления штатных функций систем и КА, возобновления штатного

решения задач КА;  $t_{об}$ ,  $t_{АС}$ ,  $t_p$ ,  $t_{пт}$  – соответственно моменты появления АС, её обнаружения (выявления), реанимации систем и КА, возобновления штатного решения задач КА.

Наиболее эффективно реализация этих принципов для всей номенклатуры типовых паттернов (режимов) функционирования КА и его управляемых движений может быть достигнута с помощью автономной СУЖ как отдельного самостоятельного программного паттерна управления системами КА в составе программного обеспечения (ПО) БВС БКУ.

Концепция построения СУЖ состоит в следующем:

- формирование её структуры СУЖ происходит на основе принципов физического и программного комплексирования бортовых средств, предназначенных для решения функциональных задач КА и его систем (включая БКУ);
- создание БС со встроенным микропроцессорным управлением и специализированным программным обеспечением.

Такая концепция позволяет решать задачу автономного контроля и диагностики бортовых систем без введения какой-либо дополнительной бортовой контрольной аппаратуры.

Это является принципиальным положением, которое позволяет избавиться от необходимости «контроля контролирующих средств», то есть избежать так называемого «проклятия размерности».

Эффективность процессов автономного управления живучестью бортовых систем КА в аномальных ситуациях можно определить на основе критерия минимизации «целевых потерь», в частности, потерь времени по целевому функционированию КА:  $\delta_r \Rightarrow \min$ .

Следует подчеркнуть, что в общем случае потери  $\delta_r$  не всегда равнозначны длительности процесса восстановления штатных функций отказавшей системы КА, поскольку подготовка к штатной работе резервных приборов или контуров (цепей) с приведением их в исходное состояние требует определённого времени (например, раскрутка гироскопов).

Результаты анализа процесса диагностики состояния БС, проводимого специалистами центра управления полётом КА, указывают на высокую эффективность методов, основанных на использовании детальной

информации о приборах, алгоритмах управления, законах движения КА, особенностях взаимосвязанного функционирования БС КА и специфических соотношениях между переменными состояниями его отдельных систем.

Так, например, неисправность БС может проявляться в рассогласовании характеристик процессов функционирования реальной системы и её эталонной модели на величины, превышающие априорно известные ошибки измерений датчиков и отработки управляющих воздействий исполнительными элементами.

Характер и значения указанных рассогласований позволяют выдвинуть конечное число гипотез, объясняющих возникшую неисправность с глубиной, достаточной для принятия решения по управлению резервами. Каждой гипотезе соответствует определённая цепочка (ветвь) взаимосвязанных состояний, описывающая возникновение отказа и развитие аномальной ситуации в системе. Для каждой такой ветви с помощью эвристических методов разрабатывается логическая модель истинности процесса контроля (таблица), на основе которой формируется соответствующий алгоритм выбора, что и обеспечивает решение задачи диагностики системы. При этом обычно применяется трёхуровневая иерархическая схема, реализованная БВС [3]:

- нижний уровень – микропроцессоры, встраиваемые непосредственно в бортовые приборы, которые обеспечивают автоматический анализ их состояния на основе измерения и оценки физических переменных (токов, напряжений, перемещений, скоростей и др.);
- средний уровень – специализированный компьютер в составе функциональной системы или специализированный компьютерный модуль в составе центральной БВС БКУ, который служит для диагностики состояния внутренних функциональных контуров, в частности, контуров управления панелями солнечных батарей, ориентацией осей КА, стабилизации напряжения питания, поддержания заданной температуры в отсеках и др.;
- высший «системный» уровень – БВС БКУ, с помощью которой обеспечивается

диагностика выполнения функциональных задач КА.

На двух последних уровнях функциональная диагностика выполняется на основе сравнения выходных сигналов модельного и фактического процессов функционирования с использованием эталонных моделей.

### 3. Метод контроля и диагностики на основе эталонной математической модели бортовых систем

Для любой БС сущность метода контроля и диагностики на основе эталонной математической модели (ММ) состоит в следующем.

АС выявляется посредством вычисления невязок  $e$  между измеренными ( $X$ ) и модельными ( $X_m$ ) значениями параметров

$$(e_1, \dots, e_N) = X(X_1, \dots, X_N) - X_m(X_{m1}, \dots, X_{mN}) \quad (1)$$

с последующей их классификацией, т.е. отнесением невязок  $e_v$  ( $v=1, \dots, N$ ) к классам W1 («норма») или W2 («ненорма»). В случае отнесения значения  $e_v$  к классу W2 фиксируется наличие АС в системе.

Замечательное свойство этого метода состоит в том, что средства, которыми обнаруживается появление АС, позволяют решать также и задачу её диагностики (выявление причины) до уровня отказавшего прибора. Это достигается с помощью логической модели ситуаций (ЛМС) [6]. Эта ЛМС связывает состояние БА системы (например, датчиков углов ориентации и угловой скорости, исполнительных органов в каждом канале управления) с распределением невязок  $e_v$  по классам W1 и W2.

Проводимый с помощью ЛМС анализ поведения выбранных параметров контроля позволяет бортовым алгоритмам системы не только выявлять отказавший её элемент, но и формировать рекомендации по управлению бортовыми ресурсами.

Следует подчеркнуть, что на практике высокую эффективность показывают методы диагностики на основе логико-аналитических моделей различных типов, особенно те, в которых допуски контролируемых параметров вычисляются как функции времени в за-

висимости от режимов работы КА и с учётом изменения условий функционирования.

Реализованная автономная СУЖ в системах управления ориентацией типа «Колибри» позволила обеспечить выполнение программы полёта многих типов КА в сложных ситуациях, связанных с отказами БА. В частности, серийных КА ДЗЗ класса «Комета» и блока выведения «Икар» в процессе выполнения программы запуска 24-х спутников «Globalstar» [5].

Общая схема СУЖ представлена на рис. 4. Задача автономного анализа работоспособности СУО решается с помощью простейшей ММ углового движения КА:

$$\dot{\omega}_i = M_i / J_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где:  $\dot{\omega}_i, J_i, M_i$  – соответственно угловое ускорение КА, его момент инерции и суммарные (управляющие и возмущающие) моменты, воздействующие на корпус КА по  $i$ -му каналу управления.

При  $M_i = f_i(U_i)$ , где  $U_i$  – управляющее воздействие по  $i$ -ой оси КА, имеем

$$\Delta\omega_i^{nm} = \frac{\int_0^{t_n} f_i(U_i) dt}{J_i}, \quad (3)$$

$$\Delta\phi_i^{nm} = \Delta\omega_i^n \cdot t_n. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta\omega_i^{nm}$  – оценка приращения угловой скорости КА от работы ИО на интервале контроля  $t_n, n=1, 2, \dots$ ;  $\Delta\phi_i^{nm}$  – оценка приращения угла ориентации КА на интервале контроля  $t_n$ ; индексом  $m$  отмечены модельные значения.

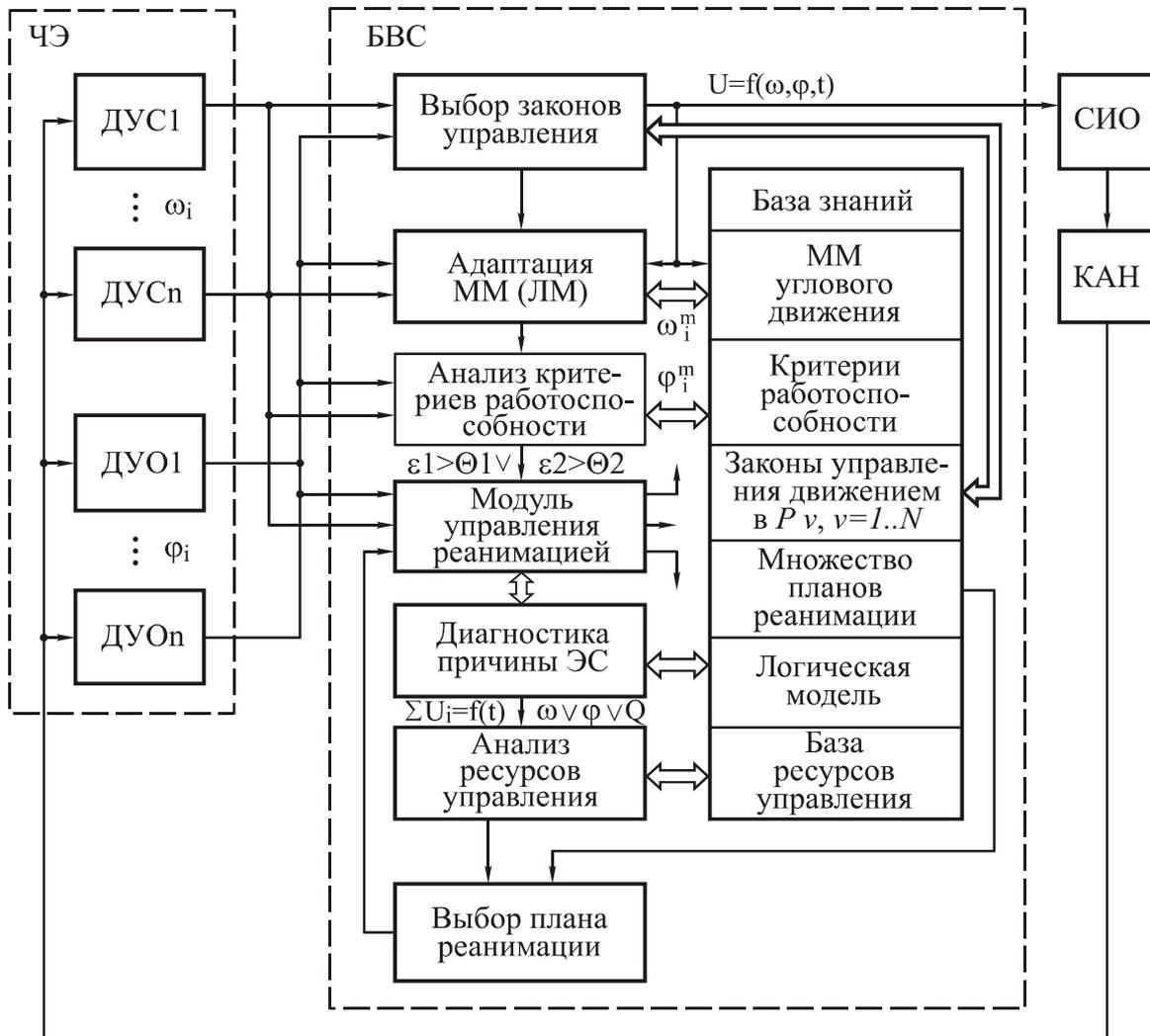
Пусть параметры контроля и критерии работоспособности системы имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon 1_i^n &= [\Delta\omega_i^n - \Delta\omega_i^{nm}] < \Theta 1_i; \\ \varepsilon 2_i^n &= [\Delta\phi_i^n - \Delta\phi_i^{nm}] < \Theta 2_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Theta 1_i = f1(t), \Theta 2_i = f2(t)$ , – допуски контроля, определяемые по априорной информации о параметрах контроля с учётом их изменения во времени в  $i$ -м канале управления ( $i = 1, 2, 3$ ).

Невыполнение одного из условий (5) свидетельствует о появлении в СУО аномальной ситуации, что уже может служить достаточным основанием для вмешательства

в управление работой СУО и принятия соответствующего решения по управлению дальнейшим функционированием КА.



| Значения показателей $i=1, 2, 3$   | Причина ЭС             |
|--|------------------------|
| $\varepsilon_{1i} < \Theta_{1i}$<br>$\varepsilon_{2i} < \Theta_{2i}$       | Норма                  |
| $\varepsilon_{1i} < \Theta_{1i}$<br>$\varepsilon_{2i} \geq \Theta_{2i}$    | Отказ ДУО <sub>i</sub> |
| $\varepsilon_{1i} \geq \Theta_{1i}$<br>$\varepsilon_{2i} \geq \Theta_{2i}$ | Отказ ДУС <sub>i</sub> |
| $\varepsilon_{1i} \geq \Theta_{1i}$<br>$\varepsilon_{2i} < \Theta_{2i}$    | Отказ ИО <sub>i</sub>  |

Логическая модель ситуаций  
 Критерии работоспособности  
 $\varepsilon_{i1} = |\Delta\omega_i - \Delta\omega_i^m| \leq \Theta_1$   
 $\varepsilon_{i2} = |\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_i^m| \leq \Theta_2$   
 $\Theta_1, \Theta_2$  - допуски контроля

Рис. 4. Система управления живучестью СУО «Колibri»

На рис. 4: ЧЭ – чувствительные элементы (ДУО, ДУС – соответственно датчики углов и угловых скоростей); БВС - бортовая вычислительная система; СИО - система исполнительных органов.

Так, одним из решений здесь может быть перевод КА в «дрейф», т.е. в неориентированный полёт с выключением всех бортовых средств, кроме БВС, КРЛ и СЭП.

Это позволяет сохранить материальную часть и даёт возможность (время) рабочей группе НКУ для анализа штатной телеметрической информации и обоснования предложений по восстановлению работоспособности КА.

С появлением в составе БКУ достаточно мощных БВС появилась возможность формировать подобные решения автономно на борту КА, в частности, с помощью программно-реализованной ЛМС. На основе анализа поведения выбранных параметров

контроля с помощью ЛМС определяется, какой из приборов и в каком канале управления отказал. Далее системой вырабатываются конкретные рекомендации по дальнейшему управлению бортовыми средствами с учётом данных о наличии резервов по каждой БА на данный момент времени.

Характер изменения параметров контроля в процессе выявления отказов при моделировании неисправностей ДУС и ИО показаны на рис. 5.

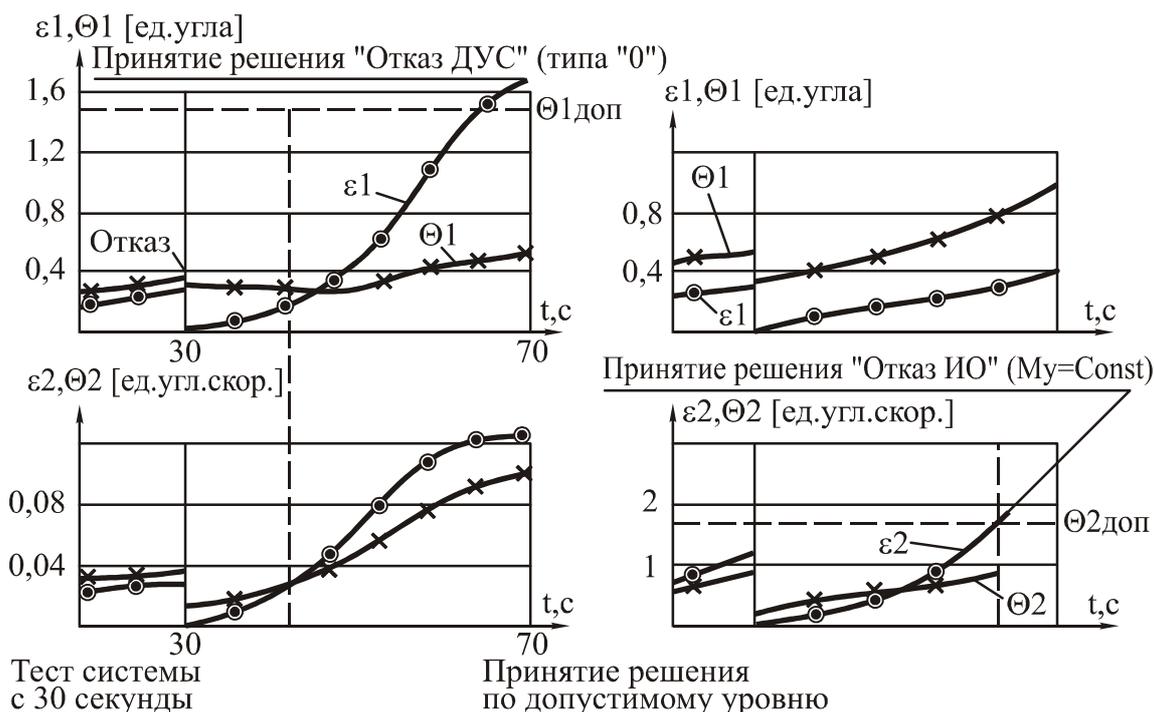


Рис. 5. Изменение параметров контроля при выявлении отказов в процессе моделирования неисправностей ДУС (левая часть) и ИО (правая часть)

Алгоритм контроля и диагностики на основе эталонных математических моделей и логических моделей ситуаций, работая в фоновом режиме относительно процесса штатного функционирования КА, показал высокую эффективность. Однако он имеет ряд недостатков:

1. Алгоритм неработоспособен на участках, характеризующихся влиянием упругих колебаний конструкции на процессы управления движением КА относительно центра масс, например, при переходных процессах, связанных с переключением панелей солнечных батарей из одной схемы в другую.

2. Алгоритм неработоспособен на участках, характеризующихся скачкообразным

воздействием на КА возмущающего момента, значительно превышающего управляющий момент, развиваемый исполнительными органами СУД (например, при отделении спускаемой капсулы или приложении корректирующего импульса).

3. Случайный кратковременный сбой выходной информации ЧЭ, не влияющий на работоспособность СУД из-за инерционности КА.

В отмеченных случаях при работоспособной СУД может быть принято решение об её отказе. Правило принятия решения по невязкам, относящимся к некоторому фиксированному моменту времени или по завершении периода контроля (т.е. по их мгно-

венным значениям) без учёта динамики их изменений во времени, может привести к ошибкам.

Для повышения достоверности принятия решений о состоянии СУД потребовалось разработать методы, в которых ошибки рассогласования в конкретные моменты времени рассматриваются как реализации случайного процесса, характеризующего работоспособность СУД, и применить для их контроля методы статистической теории распознавания образов. Такой подход к анализу ошибок рассогласования будет более точно учитывать их стохастический характер.

### 5. Метод диагностики на основе модифицированного критерия Вальда

Характеристики параметра контроля  $\varepsilon$  во времени, рассматриваемого как случайный процесс, зависят от множества факторов. К ним, в частности, относятся, ошибки измерения; погрешности обработки управляющих воздействий; погрешности моделирования динамики движения; неточности знания конструктивных параметров КА, возмущающие воздействия и другие. В этом случае при принятии решений следует руководствоваться не мгновенными значениями параметра  $\varepsilon$ , а выборкой этих значений  $\varepsilon_v$ , где  $v=1,2,\dots,m$ , то есть дискретной последовательностью значений случайного процесса  $\varepsilon_v$ . Каждое из этих значений предъявляется для контроля (и анализа) в соответствующие моменты времени  $t_v$ .

Построение классификатора при использовании последовательного критерия отношения вероятностей (ПКОВ) [7, 8] значительно облегчается, если принять во внимание, что ошибки рассогласования представляют собой «совокупность большого числа независимых причин» и в соответствии с центральной предельной теоремой Ляпунова их можно принять распределёнными по нормальному закону. Для обеспечения линейности классификатора принимаются равными дисперсии ошибок рассогласования для случаев нормальной работы и для отказа в СУД (классы W1 и W2 соответственно).

Для каждого  $m$ -го шага процесса определяется условная вероятность  $p_{1m}$  выбор-

ки  $\varepsilon(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$ , когда справедлива гипотеза W1 («норма») и условная вероятность  $p_{2m}$  выборки, когда справедлива гипотеза W2 («ненорма»). Проверка гипотезы W1 относительно гипотезы W2 сводится к выбору таких положительных чисел (пороговых значений)  $a$  и  $b$ , при которых на основании анализа неравенства

$$a \leq \ln \frac{p_{2m}}{p_{1m}} \leq b \quad (6)$$

принимается решение:

$$\begin{aligned} &\text{при } \ln(p_{2m}/p_{1m}) \geq a - \text{окончить} \\ &\quad \text{наблюдение в пользу гипотезы W1,} \\ &\text{при } \ln(p_{2m}/p_{1m}) \leq b - \text{принять} \\ &\quad \text{гипотезу W2,} \\ &\text{при } b < \ln(p_{2m}/p_{1m}) < a - \text{продолжить} \\ &\quad \text{наблюдение за случайной величиной.} \end{aligned} \quad (7)$$

Выбор пороговых значений  $a$  и  $b$  тесно связан с другими двумя величинами  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{21}$ , где  $\alpha_{12}$  - вероятность принятия гипотезы W2, когда верна гипотеза W1 (ошибка первого рода или ошибка типа «ложная тревога»), и  $\alpha_{21}$  - вероятность принятия гипотезы W1, когда верна гипотеза W2 (ошибка второго рода или ошибка типа «пропуск цели»). Связь пороговых значений  $a$  и  $b$  с величинами  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{21}$  имеет вид [7, 8]:

$$a = \ln \frac{1 - \alpha_{12}}{\alpha_{21}}, \quad b = \ln \frac{\alpha_{12}}{1 - \alpha_{21}}. \quad (8)$$

Выбор величин  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{21}$  определяется на основе анализа тех последствий, к которым может привести ошибочное решение.

В каждом конкретном случае, для каждого параметра или группы параметров этот анализ проводится отдельно и направлен на минимизацию ущерба, который может при этом возникнуть.

В космической технике ошибки второго рода (когда принимается решение «норма», а на самом деле имеет место «ненорма») в ряде случаев могут привести к неуправляемому развитию АС на борту КА. В частности, к потере времени, необходимого на их локализацию и устранение, и, как следствие,

к потере объекта (например, отказ выключения двигательной установки при совершении манёвра, отказ силового гироскопического комплекса и СУД, глубокий разряд аккумуляторных батарей и др.).

Ошибки первого рода, то есть когда объект функционирует нормально, а система контроля выдаёт «ненорма», не так катастрофичны. Последствия здесь зависят от ситуации. Если необходимо провести дополнительное тестирование систем, которое проводится бортовыми средствами и занимает немного времени, то это может быть допустимо. Но если в результате такой ошибки изделие переходит в режим ОДП (ориентированный дежурный полёт) или в НП (неуправляемый полёт), то это приведёт к необходимости вмешательства НКУ и в итоге к потере производительности КА, так как «ложная тревога» потребует значительного времени на дополнительные проверки состояния БА.

Величина логарифмического отношения правдоподобия (ЛОП)  $Z_v = \ln \frac{p(\epsilon_v / W1)}{p(\epsilon_v / W2)}$  для каждого значения  $\epsilon_v$  также является случай-

ной. Для независимого распределения  $\epsilon_v$  после  $m$  наблюдений величина суммарного ЛОП будет равна

$$\lambda_m = - \frac{p(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m / W1)}{p(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m / W2)} = - \sum_{v=1}^m \frac{p(\epsilon_v / W1)}{p(\epsilon_v / W2)} = \sum_{v=1}^m Z_v. \quad (9)$$

Полученное значение  $\lambda_m$  используется в классификаторе (7).

Недостатком ПКОВ является неопределённость с числом наблюдений. Решающие границы  $g_1(n)$  и  $g_2(n)$  здесь представляют собой две параллельные гиперплоскости в пространстве признаков. Расстояние между этими границами (ширина области неопределённости) определяется заданным уровнем ошибок классификации. С повышением точности (уменьшением  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{21}$ ) область неопределённости увеличивается, а следовательно, и среднее число наблюдений также увеличивается.

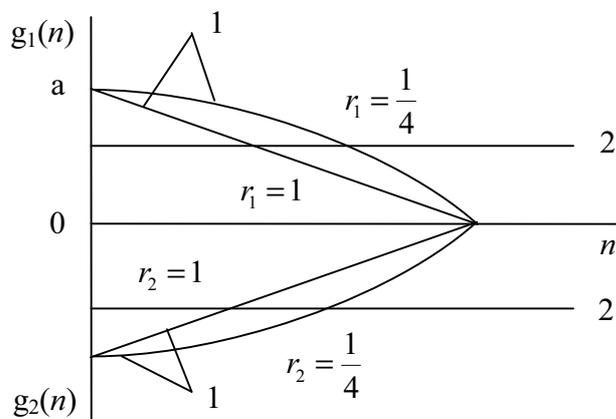


Рис.6. График пороговых значений: 1- модифицированный критерий Вальда, 2- последовательный критерий отношений вероятностей Вальда

Например, при  $\alpha_{12} = \alpha_{21} = 10^{-4}$  имеем  $a = 9,21$ ,  $b = -9,21$ , а при  $\alpha_{12} = \alpha_{21} = 10^{-5}$  получаем  $a = 11,513$ ,  $b = -11,513$ .

В модифицированном критерии Вальда (МПКОВ), в отличие от ПКОВ, пороговые значения  $a$  и  $b$  при фиксированных значениях  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{21}$  не являются постоянными величинами, а зависят от номера шага. Напри-

мер, если до начала измерений задать  $N$  – число шагов-измерений, то границы  $g_1(n)$  и  $g_2(n)$  можно определить по формулам [7, 8]:

$$g_1(n) = a \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{r_1}, \quad g_2(n) = -b \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{r_2}. \quad (10)$$

Изменение пороговых значений показано на рис. 6. Применение модифицированного алгоритма позволяет существенно (поч-

ти вдвое) сократить число шагов при принятии решений, что особенно важно в условиях реализации его на борту КА.

При использовании модифицированного критерия Вальда для решения задач контроля и диагностики динамических систем весьма важными также являются следующие факторы:

- возможность однозначного определения границ критерия для классов W1, W2. Причём это не зависит от характера распределения параметра  $\epsilon$ , а диктуется лишь заданным уровнем достоверности принятия решения;
- высокая устойчивость критерия к помехам.

На рис. 7 показана реакция штатной СУО КА и изменение во времени контролируемого параметра при случайном импульсном воздействии на систему и результаты идентификации причины с помощью модифицированного критерия Вальда. В данном случае причина АС находится вне системы и обусловлена импульсным возмущающим воздействием  $M_B$ , вызванном резким (нештатным) остановом подвижного элемента конструкции КА на одном из серийных изделий ДЗЗ. По характеру поведения контролируемого параметра  $\lambda_n$  бортовой алгоритм диагностики принял решение о работоспособности СУО.



Рис. 7. Реакция системы (СУО) на импульсное внешнее возмущение

На рис.7:  $\phi_p$ ,  $\omega_p$  – изменение угла и угловой скорости в канале рыскания, вызванное  $M_B$ ;  $\lambda_n$  – контролируемый параметр.

Для обеспечения живучести КА в бортовом программном обеспечении (БПО) предусмотрена многоуровневая процедура анализа АС и принятие, в соответствии с этим, решений по реанимации управления изделием автономными средствами. Если ситуация возникла из-за сбоя аппаратуры, то реанима-

ция может быть осуществлена алгоритмическими средствами путём организации «отката» всей системы в одно из устойчивых состояний (контрольных точек), которые либо созданы заблаговременно и хранятся в базе данных БВС, либо сформированы в процессе полёта КА. Дальнейшее функционирование КА организуется, начиная с контрольной точки. В ряде случаев реанимация заключается в переключении вышедшей из строя БА на резервные комплекты.

В более сложных случаях, когда для анализа аномальных ситуаций требуется время и привлечение к анализу наземных аналитических служб, предусматривается перевод изделия в одно из двух допустимых состояний – ОДП или НП, представленные в

табл. 1. В бортовом программном обеспечении (БПО) БКУ КА для этих целей предусмотрен специальный паттерн (режим) – «Управление КА при возникновении неисправностей» [3, 4].

Таблица 1

| Допустимые состояния КА              | Особенности функционирования   | Характер причин и последствий   | Принятие решения по реанимации  |
|--------------------------------------|--|---|---|
| Ориентированный дежурный полёт (ОДП) | Сохраняются: заданная ориентация КА; сеансы связи с НКУ; перекладки панелей СБ | Причины АС локализованы бортовыми средствами контроля, а их последствия определены. Целевые задачи не выполняются   | БКУ - в обеспечение оперативности и автономности управления;<br>НКУ - в качестве органа контроля и дополнительного анализа АС |
| Неориентированный полёт (НП)         | Сохраняются: сеансы связи с НКУ  | Причины и возможные последствия угрожают работоспособности КА или неоднозначны в рамках принятой модели контроля (искажение данных в ОЗУ БЦВМ, потеря ориентации) | НКУ;<br>БКУ – в части реализации программы реанимации из НКУ  |

### 6. Общий подход к восстановлению работоспособности бортовых систем КА

Процесс восстановления работоспособности любой бортовой системы КА включает следующую последовательность действий:

- исключение неисправного прибора из контура управления;
- анализ наличия резерва у отказавшей системы, в том числе функционального;
- подготовка и включение резервного прибора в контур управления или реконфигурация системы в случае применения функционального резерва;
- восстановление штатных функций системы КА;
- формирование информации о готовности системы к выполнению целевых функций КА.

Результаты определения неисправности прибора поступают в блок управления восстановлением работоспособности системы. Набор стратегий управления восстановлением работоспособности систем КА (переключение на структурный или функциональный резерв, последовательность изменения режимов работы, восстановление штатных функций), соответствующих возможным отказам приборов системы, реализуется на программном уровне в БВС БКУ. Основные средства управления в аномальных ситуациях приведены в табл. 2. Выбор алгоритмов реконфигурации индивидуален для каждой из систем и конкретного класса КА. Для каждого вида отказов приборов системы и их комбинаций составляются логические таблицы истинности, по типу приведённой на рис. 4, и далее после выбора соответствующей стратегии осуществляется реконфигурация её структуры.

Таблица 2

| Средства контроля и управления                                | Особенности реализации в современных КА ДЗЗ  | Достижимые свойства   |
|---|--|---|
| Система контроля и диагностики состояния бортовых средств     | Распределенная система в составе АСУ КА: автономная часть в составе БКУ; интерактивная часть в составе НКУ | Высокая автономность принятия (на борту) управленческих решений в штатных условиях работы и по большинству АС из принятого каталога вероятных.<br>Свойство восстанавливаемости в процессе эксплуатации                      |
| Контур «аварийной защиты» бортовых систем                     | Программные: отдельные модули БПО БКУ.<br>Сигналы от БА в систему прерывания БВС                           | Оперативность реагирования на АС в бортовых средствах КА.<br>Предотвращение развития АС.<br>Сохранение штатных характеристик большинства бортовых средств. Возможность оперативного выхода из АС                            |
| Бортовые аппаратные средства с интеллектуальными модулями БПО | Встроенные аппаратно-программные элементы контроля и анализа состояния БА                                  | Оперативность реагирования на АС в системах КА и БА.<br>Предотвращение развития АС в системах КА.<br>Сохранение работоспособности бортовых систем и БА.<br>Возможность оперативного восстановления работоспособности систем |
| Структурный и функциональный резервы БА и систем БКУ          | Избыточность: физическая (структурная) в составе БА и функциональная в составе бортовых систем             | Сохранение штатных характеристик бортовых систем за счёт управления структурной избыточностью или восстановление штатных функций систем и КА с допустимым изменением показателей  |

Наряду с отказами материальной части БС важное место занимает компенсация «отказов» БПО этих систем, вызванных, как правило, ошибками в программах, не выявленных в процессе их наземной отладки. Основные приёмы их выявления и устранения представлены в табл. 3, которые детально рассмотрены в [3, 4]. Здесь следует лишь подчеркнуть важность структурного построения БПО для достижения его высокой надёжности. В структуре БПО предусматривается формирование некоторого программ-

ного ядра. Ядро – это ограниченная часть БПО, которая при проявлении ошибки в комплексе БПО обеспечивает работу контура «аварийной защиты», связь с НКУ, сбор и передачу контрольной информации, переход на алгоритмический резерв и т.д. Безошибочная работа этого ядра обеспечивается посредством максимально полной его отладки на наземных комплексах с использованием моделей БА, моделей движения КА и штатной БВС.

Таблица 3

| Отказы                              | Методы восстановления   | Особенности реализации  | Методы диагностики и управления  | Примечание   |
|-------------------------------------|---|---|--|--|
| Мат. части систем КА - их БА        | 1. На основе управления структурной избыточностью БА и ее элементов.<br>2. На основе управления функциональной избыточностью систем, ввиду особенностей БПО | Программные модули в БПО с интеллектуальными функциями диагностики и управления внутренними ресурсами       | Эталонные ММ функционирования систем и БА.<br>Тестовые движения КА и их анализ.<br>Модули БПО по управлению ресурсами систем.<br>Специальная структура БПО | Обеспечение реконфигурации управления; возможности автономного выполнения ряда функций                                     |
| Ошибки в БПО систем КА, включая БКУ | На основе принципов замещения элементов БПО с выявленными ошибками на исправные   | Распределённая система контроля в БПО БКУ, включающая тесты аппаратной части систем и выявляющая ошибки БПО | Замена модулей БПО БКУ, содержащих ошибки, на исправные.<br>ПрОЗУ - частичная или полная замена отдельных программ БПО в ПЗУ БВС                           | Специфика применения таких модулей определяется свойствами БВС БКУ, выбором структуры БПО, максимально полной его отладкой |

Для восстановления отказавшей части БПО БКУ предусматривается специфическая организация вычислительного процесса, реализуемого операционной системой БВС, которая допускает параллельное исполнение штатного БПО и некой компенсационной программы из оперативного запоминающего устройства (ПрОЗУ) БВС с сохранением выполнения штатных задач. ПрОЗУ создаётся в оперативном порядке для конкретных аномальных ситуаций специалистами – разработчиками БПО и закладывается по командно-программной радиолинии НКУ в ОЗУ БВС. ПрОЗУ исполняется «параллельно» с неверно работающей штатной бортовой программой. В момент выдачи из штатного БПО ошибочных результатов программы из ОЗУ подменяют неверный результат правильными данными. Кроме того, исследуются методы прямой коррекции по радиолинии ПЗУ (флеш-память) БВС (с сохранением целевых и функциональных задач).

### Заключение

Представленные результаты исследований используются в практике создания и эксплуатации отказоустойчивых систем управления ориентацией различных типов современных КА ДЗЗ и активно развиваются в направлении обеспечения автономного управления живучестью перспективных автоматических средств космического зондирования Земли.

Примерами, демонстрирующими эффективность рассмотренных подходов и методов управления живучестью бортовых систем, являются КА типа «Комета» (20 успешных запусков), а также высокая эффективность эксплуатируемого в настоящее время на протяжении более двух лет КА ДЗЗ «Ресурс-ДК1».

## Библиографический список

1. **Ахметов, Р.Н.** Управление живучестью космического аппарата [Текст] / Р.Н. Ахметов // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2006. – №9. – С.16-20.

2. **Ахметов, Р.Н.** Концептуальные проблемы управления живучестью сложных технических объектов [Текст] / Р.Н. Ахметов [и др.] // Труды VIII Международной конференции по проблемам управления и моделирования в сложных системах (Самара, 24-28 июня 2006г.) – Самара: Сам. НЦ РАН, 2006. – С.274-284.

3. **Аншаков, Г.П.** Методы и средства управления КА зондирования Земли «Ресурс-ДК1» [Текст] / Г.П. Аншаков [и др.] // Сб. трудов XIII Всероссийского семинара по проблемам управления движением и навигации ЛА. – Самара: СГАУ им С.П. Королева. 2007, с. 4-17.

4. **Кирилин, А.Н.** Основные результаты и планы ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

## References

1. **Akhmetov, R.N.** Spacecraft survivability control / R.N. Akhmetov // All-Russian scientific-technical magazine “Polyot” (Flight), 2006. – N 9. – P.16-20. – [in Russian].

2. **Akhmetov, R.N.** Conceptual issues of compound technical objects survivability control / R.N. Akhmetov [and other] // Papers of VIII International conference on compound systems control and modeling (Samara, June 24-28, 2006). – Samara: Samara scientific center of Russian Academy of Science, 2006. – P.274-284. – [in Russian].

3. **Anshakov, G.P.** Resurs-DK1 remote sensing spacecraft control methods and facilities / G.P. Anshakov [and other] // Collected papers of XIII All-Russian seminar on aircraft motion and navigation control issues. – Samara: S.P. Korolyov Samara State Aerospace University, 2007. – P.4-17. – [in Russian].

4. **Kirilin, A.N.** Main results and plans of Samara Space Centre for design of Earth remote sensing systems assigned for socio-

economic purpose / A.N. Kirilin, R.N. Akhmetov, G.P. Anshakov // Moscow: Papers of Scientific production enterprise VNIIEEM, “Elektromekhanika” (electromechanics), 2008. – Vol.105. – [in Russian].

5. **Kirilin, A.N.** Development of Russian remote sensing space system / A.N. Kirilin, R.N. Akhmetov // Aerospace courier. – 2007. – N 2. – P.57-61. – [in Russian].

6. **Makarov, V.P.** Artificial intelligence elements as providers of satellite orientation system survivability / V.P. Makarov, S.N. Platonov // Dynamics and space objects control. Novosibirsk: “Nauka” (Science), 1992. – P.193-202. – [in Russian].

7. **Vald, A.** Sequential analysis / A. Vald – Moscow: “Fizmatgiz”, 1960. – [in Russian].

8. **Fu, K.** Sequential methods of pattern recognition and machine education / K. Fu – Moscow: “Nauka” (Science), 1971. – [in Russian].

economic purpose / A.N. Kirilin, R.N. Akhmetov, G.P. Anshakov // Moscow: Papers of Scientific production enterprise VNIIEEM, “Elektromekhanika” (electromechanics), 2008. – Vol.105. – [in Russian].

5. **Kirilin, A.N.** Development of Russian remote sensing space system / A.N. Kirilin, R.N. Akhmetov // Aerospace courier. – 2007. – N 2. – P.57-61. – [in Russian].

6. **Makarov, V.P.** Artificial intelligence elements as providers of satellite orientation system survivability / V.P. Makarov, S.N. Platonov // Dynamics and space objects control. Novosibirsk: “Nauka” (Science), 1992. – P.193-202. – [in Russian].

7. **Vald, A.** Sequential analysis / A. Vald – Moscow: “Fizmatgiz”, 1960. – [in Russian].

8. **Fu, K.** Sequential methods of pattern recognition and machine education / K. Fu – Moscow: “Nauka” (Science), 1971. – [in Russian].

## **METHODS AND MODELS OF AUTONOMOUS CONTROL OVER EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT SURVIVABILITY**

© 2008 R.N. Akhmetov

State Research and Production Space Centre “TsSKB-Progress”, Samara

There considered detection methods of remote sensing spacecraft onboard equipment abnormal functioning in real time, preventing methods of abnormal situation grow up to irreversible consequences, methods of automatic diagnosis of onboard systems failures and their revival. There given results of autonomous analysis, diagnosis and further reconfiguration of spacecraft attitude position control loop.

*Earth remote sensing spacecraft, abnormal situation, reference model, autonomous analysis, diagnosis, revival, Vald criteria*

### **Информация об авторе**

**Ахметов Равиль Нургалиевич**, генеральный конструктор, кандидат технических наук, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс». Область научных интересов: проектирование космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, их производство и эксплуатация.

**Akhmetov Ravil Nurgalievich**, First Deputy General Director – General Designer of SRP SC “TsSKB-Progress”, Head of TsSKB, candidate of technical science. Field of his scientific interest is development of spacecraft designing methods and their mathematical and algorithmic support.