

УДК 629.78

## ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ В АНОМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ

**Р. Н. Ахметов,**

канд. техн. наук, генеральный конструктор

**В. П. Макаров,**

доктор техн. наук, профессор, научный советник

**А. В. Соллогуб,**

доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник

Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Приводится постановка задачи управления космическими аппаратами мониторинга Земли в аномальных ситуациях. Определяются свойства, характеризующие их живучесть, и рассматриваются принципы построения системы управления живучестью космических аппаратов мониторинга Земли.

**Ключевые слова** — живучесть космического аппарата мониторинга Земли, аномальные ситуации, целевые показатели эффективности, точки сингулярности, точки бифуркации.

### Введение

Функционирование современных автоматических космических аппаратов мониторинга Земли (КА МЗ) состоит в выполнении на интервале активного функционирования  $T_{а.ф}$  множества целевых задач  $C = \{C_n\} = C(u)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , качество которых определяется заданными целевыми показателями эффективности (ЦПЭ). Для этого КА МЗ оснащаются совокупностью бортовых систем (БС)  $B_k = B_k(u_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , каждая из которых реализует некоторую стратегию управления  $u_k \in U$  из множества  $U$  допустимых стратегий для достижения ЦПЭ. Достижению требуемых ЦПЭ препятствуют различные внешние и внутренние возмущающие факторы. Из них наиболее значимыми, особенно при  $T_{а.ф} \geq 5$  лет на рабочих высотах полета 600–800 км, являются: воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) внешних излучений (космических, солнечных, естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ)) с эффектом накопления, ускоряющего деградацию комплектов для БС [1, 2]. Они приводят к сбоям и отказам бортовой аппаратуры (БА), к изменению текущего состояния  $S$  БС относительно исходного (штатного) состояния  $S_0$ , появлению нештатных или аномальных ситуаций (АС) на борту КА ( $S_{АС}$ ).

В момент появления АС, связанной с отказами БА, состояние БС резко изменяется. Момент возникновения АС можно рассматривать как точку бифуркации, в которой нарушается не только эволюционный регулярный характер процесса функционирования КА МЗ, но скачкообразно изменяются цели и задачи, которые должны решаться на борту в последующие моменты времени. Главной становится задача оперативной нейтрализации АС с восстановлением целевых функций КА МЗ с заданными ЦПЭ. В естественных системах разрушение сложившихся структур сопровождается процессами равновесной, гармонической или стохастической самоорганизации в точках бифуркации. В искусственных системах, к которым принадлежат автоматические КА МЗ, для выхода из точек бифуркации необходимо предусматривать механизмы «встроенной самоорганизации».

### Постановка задачи

В качестве ЦПЭ для автоматических КА МЗ принимаются следующие параметры [2–4]:

$q_1$  — линейное разрешение на местности;

$q_2$  — оперативность получения целевой информации — суммарная длительность наведения на цель, ее экспонирования, предварительной обработки и передачи данных по радиолинии в наземный специальный комплекс (НСК);

$q_3$  — производительность в номинальных условиях функционирования;

$q_4$  — оперативность выхода КА в заданный район зондирования — общая длительность процесса проведения маневра до начала наведения на цель;

$q_5$  — длительность активного функционирования ( $T_{а.ф}$ ).

Эффективность КА МЗ в общем случае оценивается векторным критерием  $\{w_j\}$ , где  $w_j$  —  $j$ -й частный критерий.

Частными критериями эффективности функционирования являются минимизация отклонений достигаемых показателей  $q_j$  относительно заданных в техническом задании значений  $q_j^3$  на интервале активного функционирования:

$$W_j = \min(q_j - q_j^3), n = 1, 2, \dots, 4. \quad (1)$$

Из частных критериев формируется составной или обобщенный критерий

$$W = W(w_j). \quad (2)$$

В работах [2, 4] обобщенный критерий представлен в графической форме в виде звезды ориентиров Боссея.

Функционирование КА МЗ в окрестности точки бифуркации на интервале нейтрализации АС  $\Delta T_H$  с восстановлением его штатных функций описывается некоторым операторным уравнением

$$\Phi\{X_{AC}, d_{Bk}, U_H, U_H^{np}, L_6, L_K, Z_6, Z_K, t\} = 0, t \in \Delta T_H, \quad (3)$$

где:

$X_{AC} = X_{AC}(S_{AC}, t)$  — фазовые переменные, определяющие текущее состояние КА при отказе одной из БС ( $B_k$ ), исходя из текущего состояния последней  $S_{Bk}(t)$  на интервале  $t \in \Delta T_H$ ;

$d_{Bk} \in D_{Bk}^{AC}$  — текущая АС, характеризующаяся определенным видом отказа БС ( $B_k$ ) КА из множества возможных в ней отказов;

$U_H = U_H(U_1, U_2, \dots), U_H^{np} = f\{X_{AC}, Z_6^0, Z_K^0, t\}$  — соответственно текущее управление и стратегия (программа) управления БС на интервале  $\Delta T_H$  при текущих ( $L_6, L_K, Z_6, Z_K$ ) и номинальных параметрах среды функционирования, здесь  $Z_6^0$  — для БС (температура, давление в отсеках, напряжение электропитания и др.) и  $Z_K^0$  — для КА (радиус орбиты, скорость движения КА, характеристики верхней атмосферы, вспышки на Солнце и др.);

$L_6, L_K$  — массо-габаритные характеристики БА и КА.

Процесс функционирования КА МЗ в АС реализуется с учетом заданных энергомассовых,

стоимостных, временных и других ресурсных ограничений [4]:

$$m_{КА} < \bar{m} \text{ (масса); } E_{КА} < \bar{E} \text{ (энергопотребление);}$$

$$S_{КА} < \bar{S} \text{ (стоимостные затраты); } t \in \Delta T_H. \quad (4)$$

К числу факторов, учитываемых при проектировании, относится и ряд ограничивающих условий или требований следующего вида:

— отказ любого элемента в бортовых средствах низшего иерархического уровня не должен приводить к нарушению функций систем более высокого уровня;

— в любой БС на ограниченном интервале времени, например  $\Delta T_{AC}$ , может возникать не более  $m$  отказов ( $m = 1, 2, \dots, M$ ).

Для КА МЗ обычно принимается  $M = 1$ . В других случаях (например, пилотируемых КА) значение  $M$  может быть больше.

Таким образом, целями и задачами функционирования КА в окрестности точки бифуркации ( $T_{AC}$ ) являются оперативное обнаружение факта появления АС и предотвращение ее развития до необратимых последствий, выявление причины АС и восстановление основных функций отказавшей БС, что обеспечивает возможность восстановления штатных функций КА.

В этой связи математическую постановку задачи можно представить следующим образом.

На основе анализа возможных АС из-за отказов БС,  $D_B^{AC} = \{D_{Bk}^{AC}\}, k = 1, 2, \dots, K$ , с учетом воздействий внешних и внутренних дестабилизирующих факторов при длительном ( $T_{а.ф} \geq 5$  лет) функционировании КА МЗ разработать методы и средства нейтрализации АС, обеспечивающие при связях (3) и ограничениях (4) оперативное восстановление функций отказавших БС за время  $\Delta T_H \rightarrow \min$  и последующее штатное функционирование КА МЗ с выбранными показателями и критериями (1), (2).

Решение такой задачи представляет собой сложную проблему методологического, научного и технологического характера, связанную с обоснованием путей реализации длительного функционирования КА МЗ с заданными ЦПЭ в изменяющихся условиях, в том числе при отказах БС.

### Методологический подход к выбору способа решения проблемы

Из анализа особенностей функционирования автоматических КА МЗ как сложной технической системы (СТС) можно выделить некоторое множество  $V$  вариантов решения этой проблемы. Тогда задача на этапе проектирования КА сводится к выбору из множества  $V$  наилучшего вари-

анта  $V^* \in V$  и соответствующих ему методов и средств реализации, которые обеспечивают решение задачи с заданными ЦПЭ  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$  на интервале  $T_{a,\phi} \geq T_{a,\phi}^3$ . Правило выбора  $P = P(T_{a,\phi}^3, Q, R)$  отражает концепцию достижения цели с учетом заданных ограничений  $R$  (4).

Обобщенная схема способов решения подобных задач, отработанных в практике создания СТС, представлена на рис. 1.

Первое направление базируется на свойстве надежности, которая в соответствии с ГОСТ 34.003–90 [5] представляет собой способность СТС выполнять требуемые функции в течение определенного промежутка времени в нормированных условиях эксплуатации. Она опирается в свою очередь на надежность (безотказность) структурных элементов СТС — аппаратных устройств и их комплектующих.

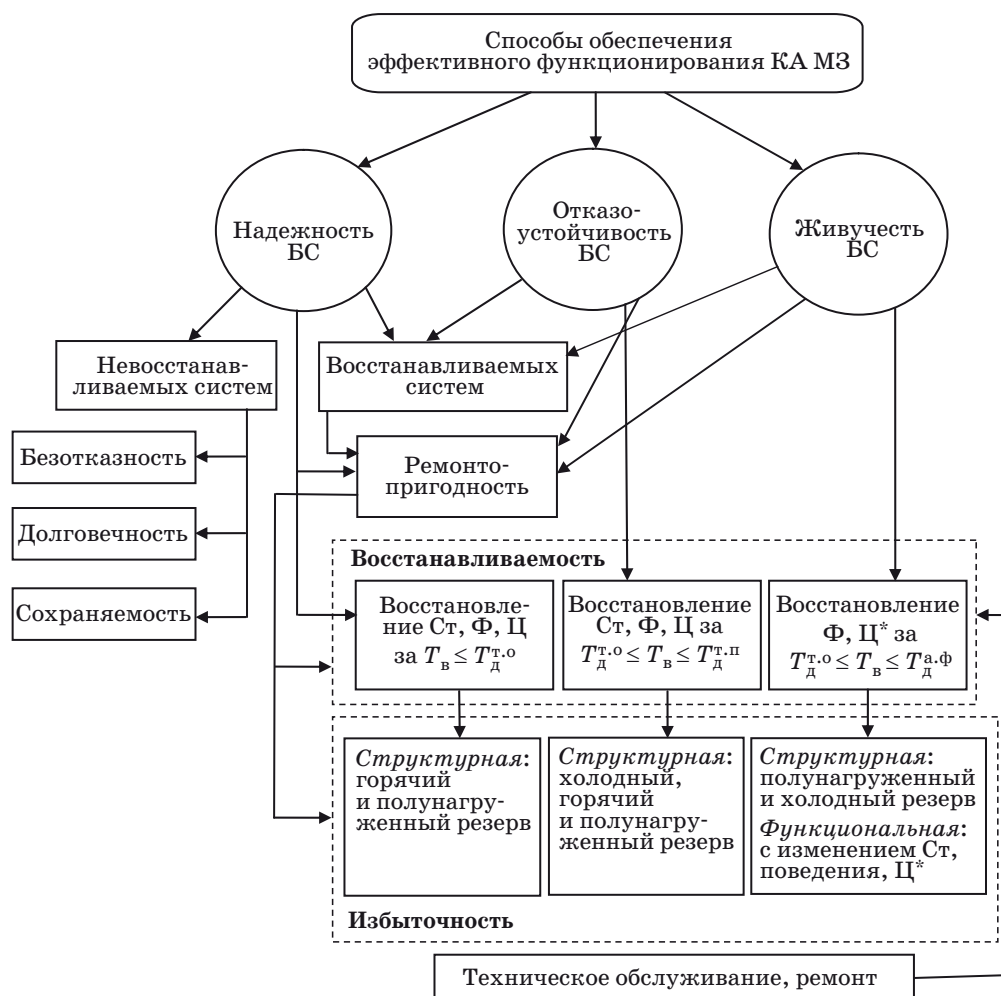
Этот путь достаточно полно изучен в теории надежности СТС и исследован на практике. Опре-

деленные трудности возникают с выбором электрорадиоэлементов при построении БА [1].

Для решения задач КА МЗ в условиях отказов систем применяются два принципиально различающихся подхода — восстановление КА после отказа системы (или ее компонента) и предотвращение отказа системы (отказоустойчивость).

Восстановление может быть прямым (без возврата к прошлому состоянию) и возвратным. Прямое восстановление основано на своевременном обнаружении отказа и устранении его последствий путем приведения системы из АС в работоспособное, причем за время, допустимое для сохранения текущего процесса. Такое восстановление возможно только для определенного набора заранее предусмотренных отказов и сбоев, обеспеченного соответствующими ресурсами.

В общем случае надежность, отказоустойчивость и живучесть СТС обеспечиваются за счет избыточности ресурсов, в первую очередь, струк-



■ Рис. 1. Модель обеспечения эффективного функционирования КА МЗ с заданными ЦПЭ: Ст, Ф, Ц — соответственно структура, функции, целевые показатели (Ц\* — допустимые эксплуатационно-технической документацией при отказах БС);  $T_в, T_д^т.о, T_д^т.п, T_д^а.ф$  — длительности: восстановления, допустимые для технологической операции, технологического процесса и заданного значения  $T_{a,\phi}$

турных и функциональных. Структурная избыточность формируется путем введения в систему, наряду со штатно работающими элементами, ряда резервных, которые в нормальном режиме функционирования системы не используются (или используются с неполной нагрузкой) и вступают в работу лишь после отказа основных элементов. Причем резервные элементы по отношению к штатным могут пребывать в различных состояниях: в холодном резерве, горячем, полунагруженном и др. От того, как используются избыточные элементы, зависят свойства СТС, уровень ее надежности, а также устойчивость функционирования или живучесть. Высокий уровень надежности СТС не гарантирует ее высокую живучесть.

Различие между надежностью, отказоустойчивостью и живучестью СТС вытекает из определения надежности как способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения [5, 6]. Следовательно, при АС, когда создаются условия, не предусмотренные эксплуатационно-технической документацией, и когда для сохранения работоспособности системы могут изменяться взаимосвязи ее структурных элементов, их функции и режимы работы, методы теории надежности не дают желаемого результата. В ряде частных случаев, когда длительность восстановления  $T_{\text{в}}$  отказавшего структурного элемента не превышает времени пребывания СТС в состоянии отказа  $T_{\text{д}}^{\text{т.о}}$ , допустимого по условиям сохранения параметров текущей технологической операции, т. е.  $T_{\text{в}} \leq T_{\text{д}}^{\text{т.о}}$ , такой отказ не приводит к нарушению работоспособности СТС. При этом надежность системы поддерживается за счет динамики процесса манипулирования резервами.

При малых значениях  $T_{\text{д}}^{\text{т.о}}$  такой эффект достижим при использовании только структурного резервирования, причем, по большей части, «горячего» резерва, так как введение в строй «холодного» приводит к затратам времени на его «разогрев», особенно в электромеханических системах (гироскопических), что далеко не всегда возможно без нарушения параметров выполняемой технологической операции и структуры системы. Применение в таких условиях функциональных резервов для поддержания надежности (как и отказоустойчивости) СТС практически невозможно, поскольку связано с изменением структуры системы и ее поведения.

Второй подход формируется на основе свойства отказоустойчивости БС, которое чаще всего определяется как способность системы сохранять свою работоспособность, выполняя заданные функции, или восстанавливаться после воздействия одного или нескольких сбоев и отказов компонентов, причем с сохранением и структуры,

и функций, и показателей системы. Отказоустойчивость может измеряться коэффициентом [6]

$$A = (T_{\text{м.о}} - (T_{\text{о.б}} + T_{\text{в}})) / T_{\text{м.о}},$$

где  $T_{\text{м.о}}$  — время между отказами;  $T_{\text{о.б}}$  — время, необходимое для обнаружения (выявления) отказа и выбора решения по восстановлению;  $T_{\text{в}}$  — время восстановления после отказа или сбоя.

Следовательно, в отличие от надежности свойство отказоустойчивости допускает возможность функционирования системы при отказах и сбоях с некоторыми потерями, определяемыми временем простоя и восстановления структуры и функций. Практическая его реализация также требует использования структурной избыточности элементов, обеспечивающей восстановление структуры системы и показателей за время  $T_{\text{д}}^{\text{т.о}} \leq T_{\text{в}} \leq T_{\text{д}}^{\text{т.п}}$ . По сути, отказоустойчивость является промежуточным свойством между надежностью и живучестью.

Третий подход базируется на свойстве живучести БС.

Для обеспечения этого свойства пригодны все формы избыточности (структурная, функциональная, информационная, временная), поскольку допускается возможность изменения не только структуры и поведения СТС, но и ее показателей в пределах, устанавливаемых эксплуатационно-технической документацией [6].

Таким образом, живучесть связана с необходимостью поддержания в заданных пределах ЦПЭ на всех этапах жизненного цикла изделия для всех режимов функционирования СТС при возникновении ситуаций, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации. Живучесть более характерна для СТС с длительным сроком эксплуатации, а также человекомашинных систем: телекоммуникационных и энергетических сетей, подводных лодок, электростанций, космических систем.

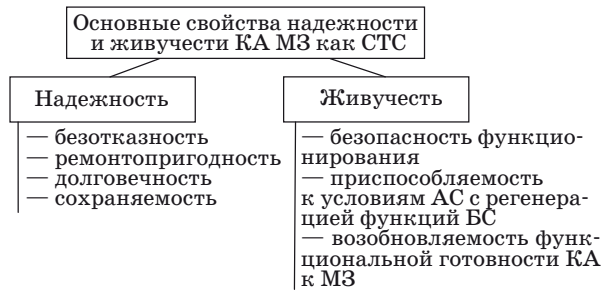
### Свойства живучести КА МЗ

В ГОСТ [5, 6] регламентируются основные свойства, определяющие надежность, но свойства, определяющие живучесть СТС, отсутствуют. В соответствии с этим ставится задача: на основе анализа ЦПЭ КА МЗ, решения оптимизационных задач выбора проектных параметров КА выделить свойства, определяющие живучесть КА МЗ, единичные и комплексные показатели живучести КА, критерии и области живучести КА, а также принципы построения бортовой системы управления живучестью КА в АС [2].

Основные факторы, снижающие живучесть КА МЗ, и принципы нейтрализации их воздействия, положенные в основу построения системы управления живучестью КА (СУЖ КА), приведе-



■ Рис. 2. Основные дестабилизирующие факторы и принципы нейтрализации их воздействия: ГКЛ — галактические космические лучи; СКЛ — солнечные космические лучи; ИС — интегральная схема; ОЭП — оптико-электронный преобразователь; ФЭП — фотоэлектрический преобразователь; БПО — бортовое программное обеспечение



■ Рис. 3. Основные свойства надежности и живучести КА

ны на рис. 2. Для сравнения представлены основные свойства, определяющие надежность и живучесть (рис. 3).

Так, для невозстанавливаемых систем свойства живучести и отказоустойчивости обеспечиваются за счет свойства надежности, которое включает в себя безотказность, долговечность и сохраняемость.

Для восстанавливаемых систем надежность, отказоустойчивость и живучесть базируются на свойстве ремонтпригодности, которое в свою очередь опирается на избыточность технических средств (ресурсов), а также на техническое обслуживание и ремонт.

### Показатели и критерии живучести при построении СУЖ КА

Рассмотрим основные свойства живучести КА МЗ и их место при поддержании функциональной готовности КА МЗ и реализации СУЖ КА.

Функциональная готовность КА МЗ — это способность поддерживать потенциальные возможности целевого функционирования при всех условиях полета, включая АС.

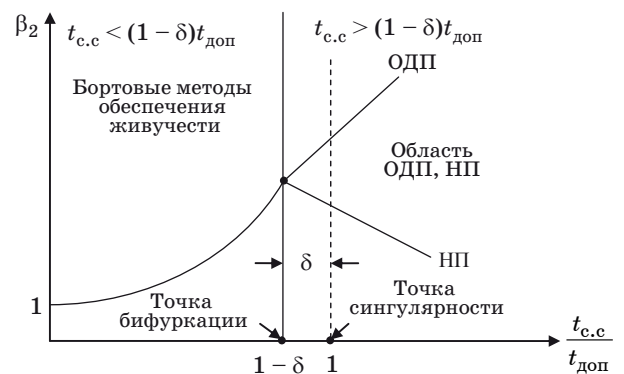
Для исключения возможности попадания системы в область катастрофического развития АС, характеризующейся большой степенью неопределенности с появлением каскада бифуркаций, в СУЖ необходимо предусматривать переход к заранее подготовленным устойчивым состояниям КА, в которых исключается возможность нежелательного развития АС.

В качестве таких состояний можно рассматривать переход в ОДП (ориентированный дежурный полет) и НП (неориентированный полет). Переход в ОДП и НП должен проводиться не в точке сингулярности, а несколько «левее» ее на величину  $\delta$  — в точке бифуркации. Для случая двух временных факторов положение точек показано на рис. 4.

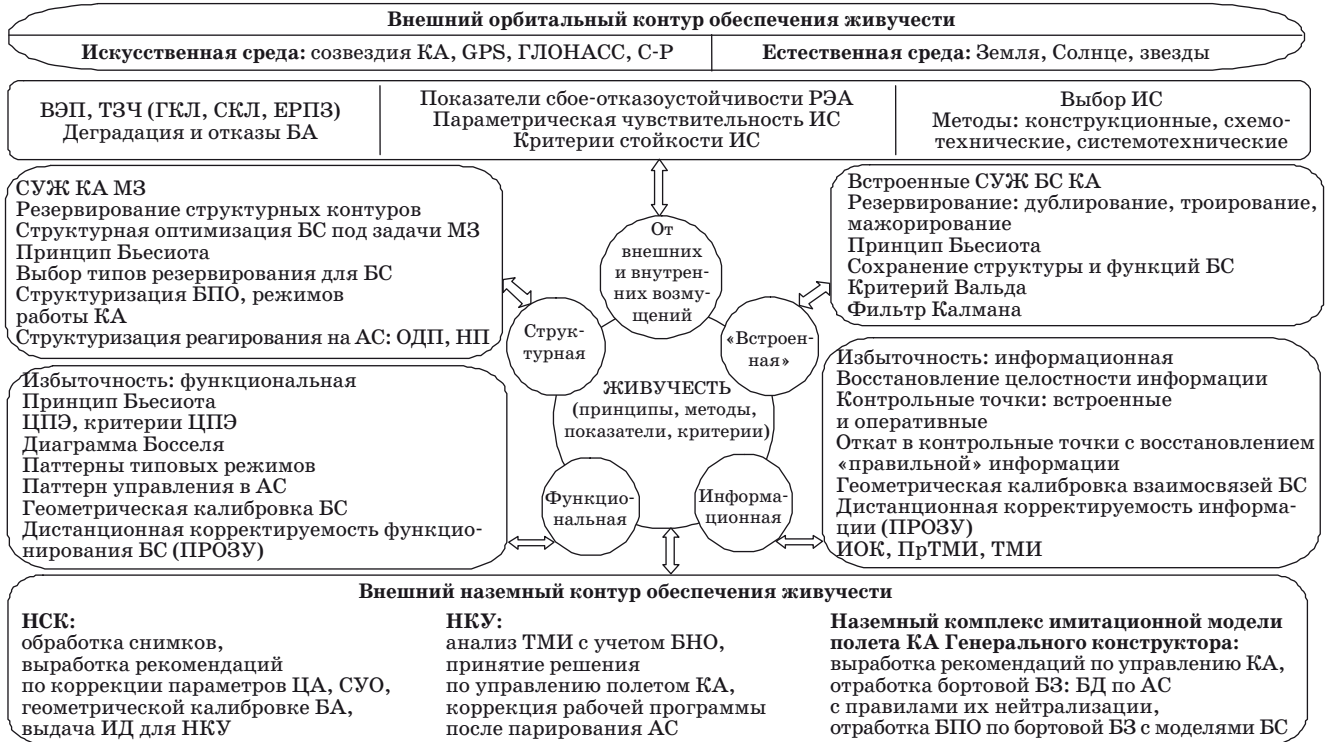
Режимы ОДП и НП реализуются как с использованием бортовых алгоритмов «встроенной самоорганизации», так и с привлечением наземного комплекса управления (НКУ).

Критерии автономности низкоорбитальных КА МЗ детально описаны в работе [7].

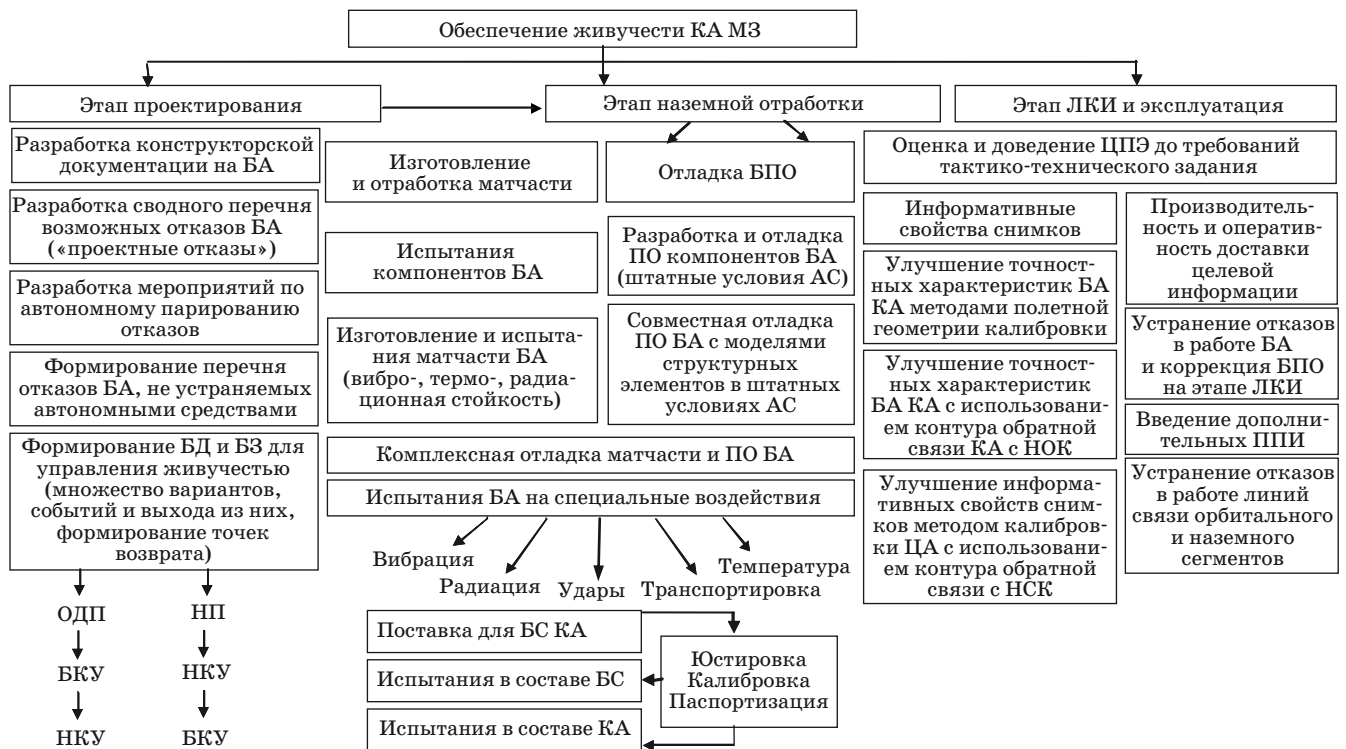
Для реализации принципа целостности информации, используемой для поддержания функциональной готовности КА МЗ (которая нарушается из-за аппаратных сбоев и отказов, а также программных ошибок), в бортовой базе знаний СУЖ предусматривается набор решающих правил, приводящих к восстановлению на регистрах вычислительных устройств «правильной информации». Это либо заранее подготовленный фиксированный набор данных, хранящихся в бортовой базе, либо оперативно подготавливаемый в реальном масштабе времени в ходе управления КА. Восстановление целостности информации осуществляется путем «отка-



■ Рис. 4. Области режимов СУЖ:  $t_{c.c.}$ ,  $t_{доп}$  — время скрытого и допустимого состояния отказа соответственно



**Рис. 5.** Принципы диагностики АС, критерии и схемы взаимодействия компонентов СУЖ КА: ПРОЗУ — программа, выполняемая из оперативного запоминающего устройства; ИОК — информация оперативного контроля; ТМИ — телеметрическая информация; ПрТМИ — программная ТМИ; БЗ — база знаний; БД — база данных; БНО — баллистико-навигационное обеспечение; ЦА — целевая аппаратура; СУО — система управления ориентацией; ИД — исходные данные



**Рис. 6.** Схемы обеспечения живучести КА МЗ на всех этапах жизненного цикла: ЛКИ — лётно-конструкторские испытания; БКУ — бортовой комплекс управления; НОК — наземный отлабочный комплекс; ППИ — пункт приема информации

та» процесса не в его начало, а в последнее из запомненных «правильных состояний». В случае реализации режимов ОДП и НП предусматривается возможность дистанционной коррекции бортовой базы данных [2].

Принципы диагностики АС и схемы взаимодействия компонентов системы управления живучестью КА с внешними контурами управления полетом (орбитальным и наземным) представлены на рис. 5, схемы обеспечения живучести КА МЗ на различных этапах жизненного цикла — на рис. 6.

### Заключение

Обеспечение потенциальной способности КА МЗ к эффективному функционированию на всех этапах полета является наукоемким процессом, который накладывает особые требования на управление КА в АС. Предложенный подход позволяет формировать основные свойства, характеризующие живучесть КА МЗ, и принципы управления техническим состоянием БС в целях оперативной нейтрализации АС с последующим восстановлением целевого функционирования КА МЗ.

### Литература

1. Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Проблемы обеспечения сбое-отказоустойчивости бортовой аппаратуры КА дистанционного зондирования Земли от воздействия излучений космического пространства // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 72–78.
2. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Соллогуб А. В., Макаров В. П. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных КА зондирования Земли. — М.: Машиностроение, 2010. — 384 с.
3. Соллогуб А. В., Аншаков Г. П., Данилов В. В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли. Математические модели повышения эффективности КА. — М.: Машиностроение, 1993. — 368 с.
4. Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Критериальный подход к управлению живучестью автоматических КА ДЗЗ // Полет. 2010. № 6. С. 24–29.
5. ГОСТ 34.003–90 Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 23 с.
6. ГОСТ 27.002–89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 37 с.
7. Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Оценка автономности низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли // Полет. 2009. № 10. С. 7–14.

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Российская универсальная национальная электронная библиотека (РУНЭБ) начала реализацию проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте РУНЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных РУНЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, в том числе добавлять публикации, которых нет в базе данных РУНЭБ, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.