

УДК 629.78

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИВУЧЕСТЬЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ

© 2012 Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб

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

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

Космический аппарат, мониторинг Земли, целевые показатели эффективности, аномальные ситуации, живучесть, точки сингулярности и бифуркации.

Введение

Цель функционирования современных автоматических космических аппаратов мониторинга Земли (КА МЗ) состоит в выполнении на интервале активного функционирования (Таф) множества целевых задач с заданными целевыми показателями эффективности (ЦПЭ). Для этого КА МЗ оснащаются совокупностью бортовых систем (БС), каждая из которых реализует требуемую последовательность управлений, отвечающих выбранной стратегии управления для выполнения ЦПЭ.

Достижению заданных ЦПЭ препятствуют различные внешние и внутренние возмущающие факторы. Наиболее существенными из внешних факторов, особенно при длительном (Таф ≥ 5 лет) полёте вблизи естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), являются воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) внешних излучений (космических, солнечных, ЕРПЗ) с эффектом накопления. Это ускоряет деградацию комплектующих электро-радиоэлементов для бортовых систем, вызывая их сбои и отказы, изменение текущего технического состояния относительно их исходного (штатного) состояния, что проявляется в виде нештатных или аномальных ситуаций (АС) на борту КА [1, 2, 3].

В момент возникновения АС (T_{AC}) нарушается не только регулярный (эволюционный) характер процесса функционирования КА МЗ, но и скачкообразно изменяются цели и задачи, которые должны решаться на борту в последующие моменты времени. Главной становится задача оперативной нейтрализация АС с восстановлением целевых функций КА МЗ.

Решение такой задачи представляет собой сложную научно-техническую проблему, связанную с выбором приемлемых путей обеспечения длительного полёта КА МЗ с заданными ЦПЭ в изменяющихся условиях, в том числе при отказах БС.

Подход к выбору способа решения проблемы

В естественных системах разрушение сложившихся структур в точках бифуркации сопровождается в последующем процессами самоорганизации. В искусственных системах, как например в автоматических КА МЗ, для выхода из точек бифуркации необходимо предусматривать элементы «встроенной самоорганизации» как основы механизма их «адаптивно-компенсаторной регенерации».

Общие подходы к решению подобных проблем и повышению эффективности функционирования КА МЗ при отказах БС можно представить в виде схемы на рис. 1. Это подходы сформированы на

основе системных свойств: надёжности, отказоустойчивости и живучести. Их отдельные фрагменты отработаны в практике создания сложных технических систем (СТС) широкой номенклатуры и назначения (от информационно-вычислительных систем до электростанций и подводных лодок) [2,3,6,7]. Из анализа этих способов можно заключить следующее.

Для *невосстанавливаемых* систем отказоустойчивость и живучесть обеспе-

чиваются за счёт свойства надёжности, включающего в себя безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

Для *восстанавливаемых* систем отказоустойчивость и живучесть опираются на свойства ремонтпригодности и восстанавливаемости за счёт избыточности ресурсов аппаратно-программных средств.

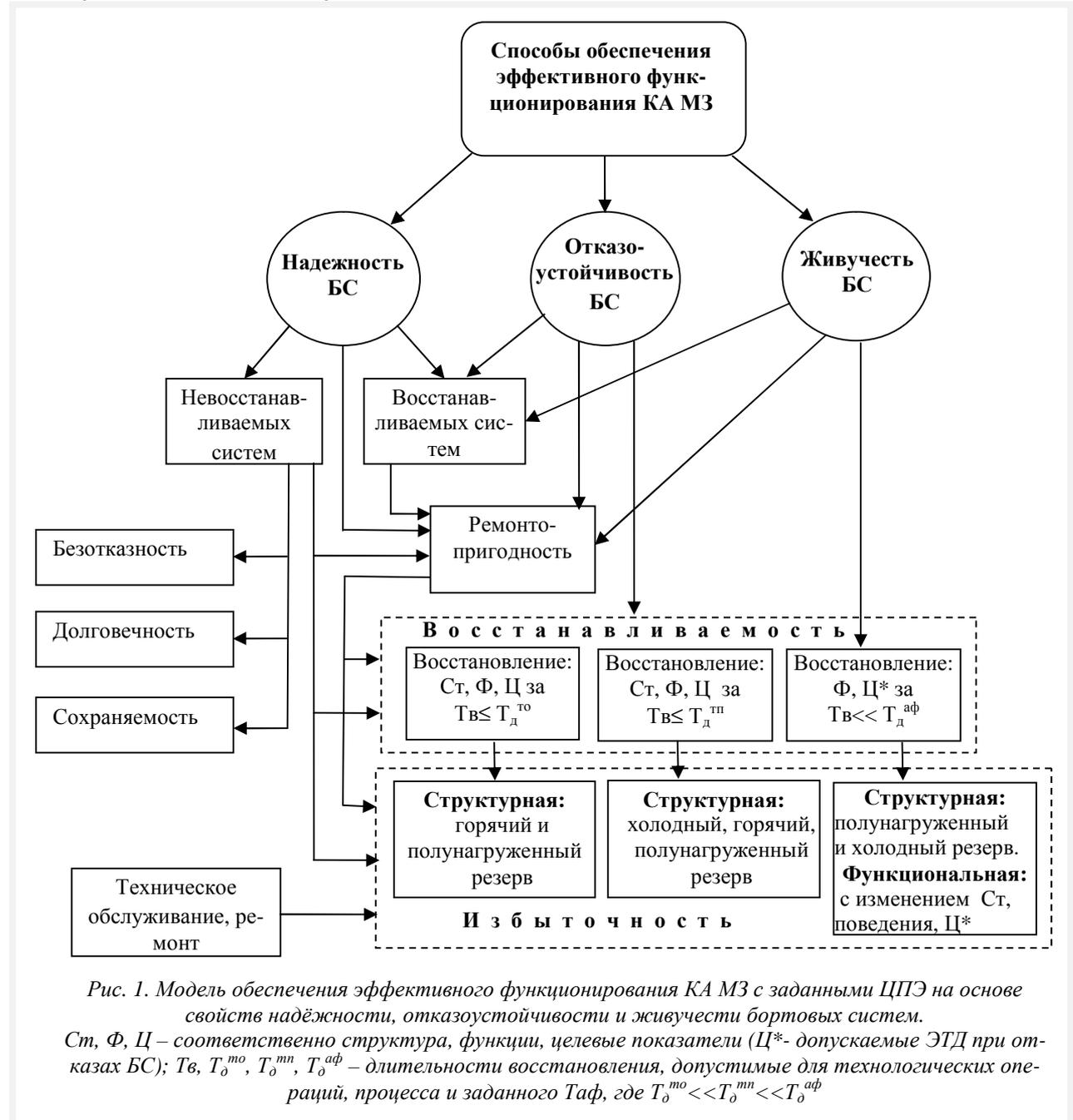


Рис. 1. Модель обеспечения эффективного функционирования КА МЗ с заданными ЦПЭ на основе свойств надёжности, отказоустойчивости и живучести бортовых систем.

Ст, Ф, Ц – соответственно структура, функции, целевые показатели (Ц* – допускаемые ЭТД при отказах БС); T_v , T_d^{mo} , T_d^{mn} , T_d^{af} – длительности восстановления, допустимые для технологических операций, процесса и заданного Таф, где $T_d^{mo} \ll T_d^{mn} \ll T_d^{af}$

Первый подход к решению проблемы базируется на свойстве надёжности, которая в соответствии с ГОСТ 34.003-90 [5] представляет собой способность СТС выполнять требуемые функции в течение определённого промежутка времени в нормированных условиях эксплуатации. Она опирается, в свою очередь, на безотказность структурных элементов СТС.

Такой подход достаточно полно изучен в теории надёжности и исследован на практике. Тем не менее высокий уровень надёжности систем не гарантирует её высокую живучесть. Кроме того, на практике определённые трудности возникают также и с выбором электро-радиоизделий (ЭРИ) при построении надёжной бортовой аппаратуры систем [1,2].

Различие между надёжностью, отказоустойчивостью и живучестью СТС вытекает из определения надёжности как способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения [4,6]. Следовательно, когда возникают условия (аномальные ситуации), не предусмотренные эксплуатационно-технической документацией (ЭТД), и когда для сохранения работоспособности системы требуется изменять взаимосвязи её структурных элементов, их функции и режимы работы, методы теории надёжности не дают желаемого результата. Однако в ряде частных случаев, когда длительность восстановления T_v отказавшего структурного элемента не превышает времени пребывания СТС в состоянии отказа (T_d^{TO}), допустимого по условиям сохранения параметров текущей технологической операции (ТО), $T_v \leq T_d^{TO}$, то такой отказ не приводит к потере работоспособности СТС и её живучести.

При малых значениях T_d^{TO} аналогичный эффект достижим при структурном резервировании БА, причём в «горячем» режиме, так как введение в строй «холодного» резерва связано с затратами времени на его «разогрев», особенно значительными в электромеханических системах (типа гироскопических), что далеко не всегда возможно без нарушения пара-

метров выполняемой технологической операции и структуры системы. Применение в таких условиях функциональных резервов для поддержания надёжности (как и отказоустойчивости) СТС практически невозможно, поскольку связано с изменением структуры системы и её 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. Причём восстанавливаться с сохранением и структуры, и функций, и показателей системы, что связано с подходами и технологиями, позволяющими быстро реанимировать (или заменить) неисправный элемент, чтобы понести при этом минимальные потери. Отказоустойчивость можно измерять коэффициентом:

$$A = (T_{MO} - (T_{OB} + T_v)) / T_{MO},$$

где A - отказоустойчивость, T_{MO} - время между отказами, T_{OB} - время, необходимое для обнаружения (выявления) отказа и выбора решения по восстановлению, T_v - время восстановления после отказа или сбоя в диапазоне допустимых значений для технологического процесса без потери основных функций БС.

Следовательно, в отличие от надёжности, свойство отказоустойчивости допускает возможность функционирования системы при отказах и сбоях с некоторыми потерями, определяемыми временем простоя и восстановления структуры и функций [6,7]. Практическая реализация этого свойства также связана с использованием структурной избыточности элементов, обеспечивая восстановление структуры системы и показателей за время $T_v \leq T_d^{TO}$.

По сути, отказоустойчивость является промежуточным свойством между надёжностью и живучестью.

Третий подход базируется на свойстве живучести БС. Для обеспечения это-

го свойства пригодны все формы избыточности (структурная, функциональная, информационная, временная), поскольку допускается возможность изменения не только структуры и поведения СТС, но и её показателей в пределах, устанавливаемых ЭТД [6]. Следовательно, живучесть связана с необходимостью поддержания в заданных пределах ЦПЭ для всех режимов функционирования КА МЗ при возникновении ситуаций, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации.

Свойства живучести КА МЗ

В ГОСТ [5,6] регламентируются основные свойства, характеризующие надёжность, но частные свойства, определяющие живучесть сложных технических систем (СТС), отсутствуют.

В этой связи, исходя из особенностей функционирования КА МЗ при появлении АС и поддержания в заданных пределах ЦПЭ, возникают задачи: выделить основные свойства, определяющие живучесть КА МЗ, предложить единичные и комплексные показатели живучести, разработать критерии и области живучести КА, а также принципы построения бортовой системы управления живучестью КА (СУЖ КА) в аномальных ситуациях.

По результатам исследований различных КА выявлены основные компоненты комплексного свойства живучести, в сравнении со свойствами надёжности, проведена их декомпозиция и получены принципы их реализации, представленные на рис. 2 - 6 .

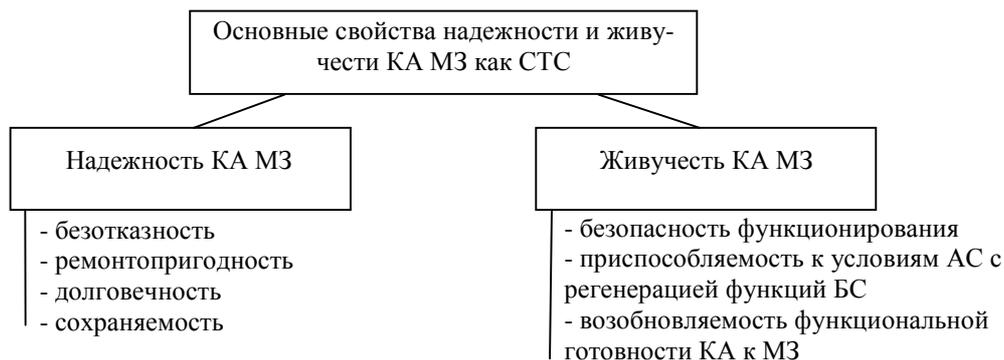


Рис. 2. Свойства, определяющие надёжность и живучесть КА



Рис. 3. Декомпозиция свойства безопасности функционирования КА при АС

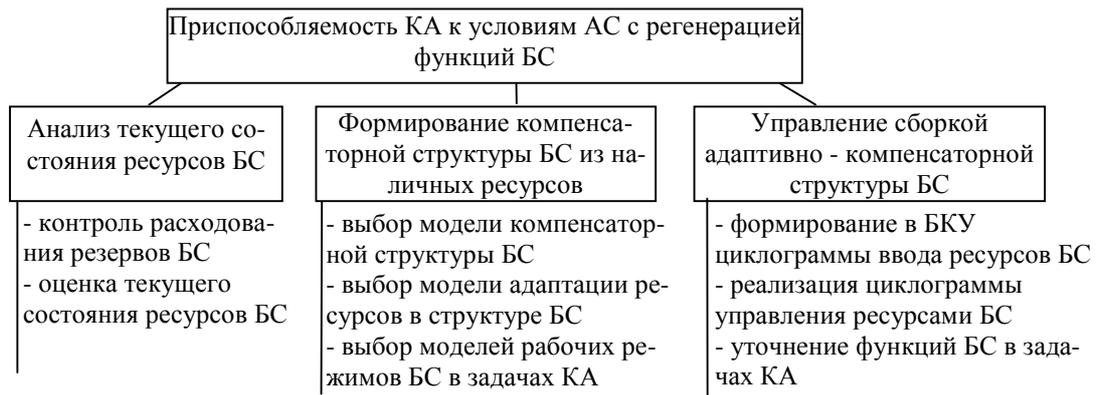


Рис. 4. Декомпозиция свойства приспособляемости КА к условиям АС с регенерацией функций БС

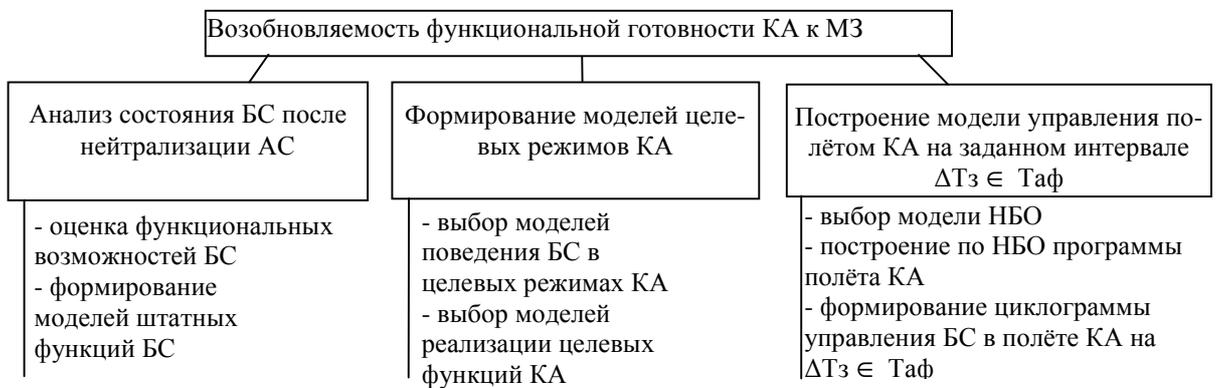


Рис. 5. Декомпозиция свойства возобновляемости функциональной готовности КА к мониторингу Земли

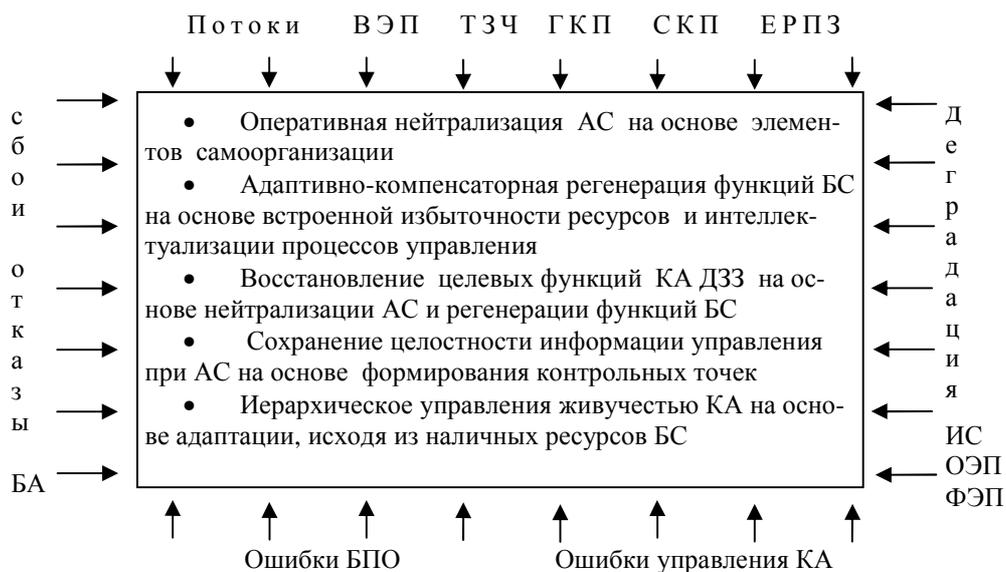


Рис. 6. Основные дестабилизирующие факторы и принципы нейтрализации их воздействия

Показатели и критерии живучести при построении СУЖ КА

Рассмотрим основные аспекты свойств живучести КА МЗ и их место при поддержании функциональной готовности КА к МЗ и реализации соответствующей системы управления живучестью (СУЖ КА).

Функциональная готовность КА к МЗ определяется как потенциальная возможность целевого функционирования КА и задаётся в виде временного интервала Таф, потенциально пригодного для организации процесса мониторинга, то есть в течение этого периода соблюдаются условия освещённости земной поверхности и бортовые системы КА находятся в работоспособном состоянии. Значение Таф можно вычислить как результат наложения этих двух процессов [2,4].

В общем случае функциональная готовность определяется коэффициентом готовности Кг, максимальное значение которого характеризует наивысшую (исходную) работоспособность БС.

При возникновении АС работоспособность БС нарушается вследствие отказа компонентов. Поэтому, наряду с задачей регенерации утраченных функций БС возникает задача реанимации функциональной готовности КА к МЗ на уровне, близком к исходному (с допустимой деградацией ЦПЭ).

Что касается улучшения показателей по разрешающей способности получаемых снимков, то здесь важным фактором является реализация **полётной калибровки** бортовых систем, влияющих на качество целевой информации [2].

Безразмерный модифицированный **показатель Бьесиота**, отражающий способность системы реагировать на АС с целью нейтрализации её последствий, определяется выражениями [2]:

$$\beta_2 = \beta_2 \left(\frac{t_{с.с}}{t_{доп}} \right), \quad \beta_2 = \frac{C_{реар}}{C_{угр}} \geq \frac{t_{доп}}{t_{доп} - t_{с.с}}$$

или

$$\beta_2 \geq \frac{1}{1 - \frac{t_{с.с}}{t_{доп}}}$$

где $C_{реар}$ – показатель, определяющий скорость реагирования системы на АС; $C_{угр}$ – показатель, определяющий скорость распространения угрозы внутри системы; $t_{с.с}$ – время жизни скрытого состояния АС; $t_{доп}$ – допустимое время развития АС.

Отношение $\frac{t_{с.с}}{t_{доп}} = 1$ можно использовать в качестве классификатора. Это позволяет выделить две области реагирования на АС: область, в которой развитие АС может быть локализовано бортовыми средствами СУЖ КА, и область $t_{с.с} > t_{доп}$ катастрофического развития АС. На рис. 7 приведены области возможного развития АС β_2

Эта область характеризуется тем, что развитие АС может быть локализовано бортовыми средствами СУЖ КА, и область $t_{с.с} > t_{доп}$ катастрофического развития АС. На рис. 7 приведены области возможного развития АС β_2



Рис. 7. Области обеспечения живучести

При $\Delta t = t_{доп} - t_{с.с} \rightarrow 0$ показатель $\beta_2 \rightarrow \infty$. Следовательно, с позиции адаптивности выхода из АС точка =1 является сингулярной.

Важно отметить, что для распознавания и принятия решения по локализации АС требуется дополнительное время $\Delta t_{лок}$ (рис.8).

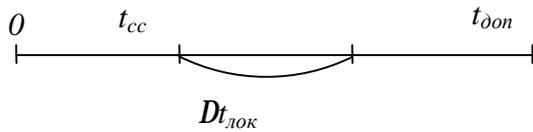


Рис. 8. Три временных параметра АС

Тогда показатель Бьесиота для трёх временных факторов (β_3) принимает вид $\frac{t_{доп}}{\Delta t_{лок}} \geq \beta_3 \geq 1 + \frac{t_{сс}}{\Delta t_{лок}}$.

Области живучести для этого случая приведены на рис. 9. При этом сингулярная

точка соответствует величине $\frac{t_{доп}}{\Delta t_{лок}} - 1$ на оси абсцисс.

Для исключения возможности попадания системы в область катастрофического развития АС, характеризующейся большой степенью неопределённости с появлением каскада бифуркаций, в СУЖ необходимо предусматривать переход к заранее подготовленным устойчивым состояниям КА, в которых не допускается нежелательное развитие АС.

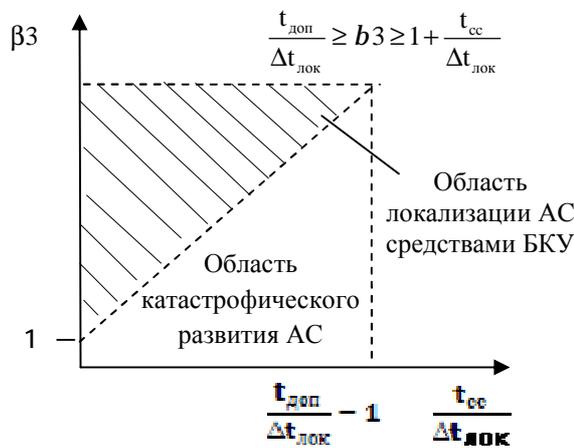


Рис. 9. Области живучести КА

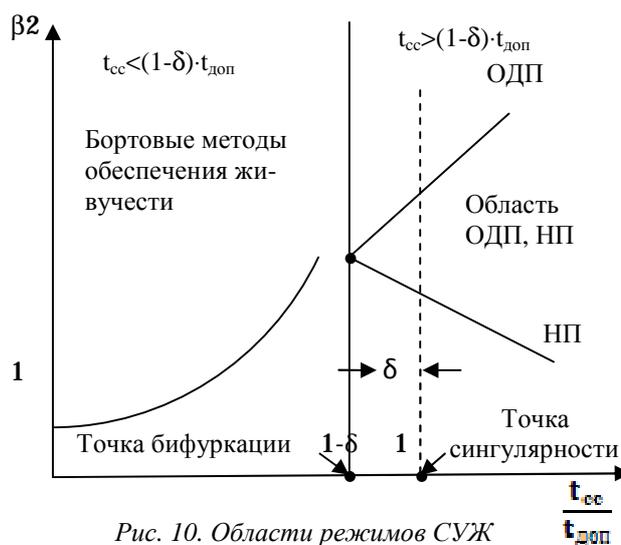


Рис. 10. Области режимов СУЖ

В качестве таких состояний можно рассматривать режимы ориентированного дежурного полёта (ОДП) и неориентированного полёта (НП). Переход в эти режимы должен соответствовать не точке сингулярности, а предшествующей ей точке бифуркации, отстоящей на величину δ , как показано на рис.10.

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

Критерии автономности для низко-орбитальных КА МЗ детально описаны в [7]. Информация, необходимая для поддержания функциональной готовности КА МЗ, может нарушаться из-за аппаратных сбоев, отказов и программных ошибок. Исключение влияния их последствий реализуется на основе принципа целостности информации, для чего в бортовой базе знаний СУЖ предусматривается набор решающих правил, с помощью которых проводится восстановление на регистрах вычислительных устройств «правильной информации». Это фиксированный набор данных, либо заранее подготовленный и хранящийся в базе знаний, либо оперативно формируемый в реальном масштабе времени в ходе управления КА. Восстановление целостности информации осуществляется путём «отката» процесса не в его начало, а в последнее из запомненных «правильных состояний».

В случае реализации режимов ОДП и НП обычно предусматривается возмож-

ность дистанционной коррекции бортовой базы данных, аналогично приведённой в [2].

На рис. 11 представлена совокупность принципов диагностики АС, критерии и схемы взаимодействия компонентов СУЖ КА с внешними контурами управления полётом (орбитальным и наземным), полученная исходя из оперативного выявления АС и её парирования с восстановлением штатного функционирования КА МЗ [8].

Заключение

Процесс обеспечения способности КА МЗ эффективно функционировать на длительных этапах полёта накладывает особые требования по оперативному управлению живучестью бортовых систем в аномальных ситуациях, из которых определяются подходы, принципы и методы их реализации.

На основе предложенного подхода сформированы основные свойства, характеризующие живучесть КА МЗ при нарушении штатных условий полёта.

Принципы управления техническим состоянием БС в обеспечение живучести КА разработаны исходя из оперативной нейтрализации последствий АС с регенерацией основных функций БС.

Методы восстановления штатного функционирования КА МЗ после воздействия АС реализуются с учётом допустимой (по ЭТД) деградации целевых показателей.

Внешний орбитальный контур обеспечения живучести

Искусственная среда :	Естественная среда :
созвездия КА, GPS, Глонасс, С - Р	Земля, Солнце, Звезды

- ВЭП, ТЗЧ(ГКЛ, СКЛ, ЕРПЗ) - Дegrадация и отказы БА	- Показатели сбое -отказоустойчивости РЭА - Параметрическая чувствительность ИС - Критерии стойкости ИС	- Выбор ИС - Методы: конструкционные, схемотехнические, системотехнические
--	---	---



Внешний наземный контур обеспечения живучести

НСК	НКУ	Наземный комплекс имитационной модели
- обработка снимков, - выработка рекомендаций по коррекции параметров ЦА, СУО, геометрической калибровки БА, - выдача ИД для НКУ	- анализ ТМИ с учетом БНО, - принятие решения по управлению полетом КА, - коррекция РП после парирования АС	- полета КА генерального конструктора - выработка рекомендаций по управлению КА, - отработка бортовой БЗ: БД по АС с правилами их нейтрализации - отработка БПО по бортовой БЗ с моделями БС

Рис. 11. Схема диагностики АС и взаимодействия компонентов распределённой системы управления живучестью КА

Библиографический список

1. Ахметов, Р. Н. Проблемы обеспечения сбое-отказоустойчивости бортовой аппаратуры КА ДЗЗ от воздействия излучений космического пространства [Текст] / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // «Мехатроника, автоматизация, управление». - 2009. - № 11. - С. 72-78.

2. 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.

3. Соллогуб, А. В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: математические модели повышения эффективности КА. [Текст] / А. В. Соллогуб, Г. П. Аншаков, В. В. Данилов - М.: Машиностроение, 1993. – 368 с.

4. Ахметов, Р. Н. Критериальный подход к управлению живучестью авто-

матических КА ДЗЗ [Текст] / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Полет. – 2010. - № 6. - С. 24-29.

5. ГОСТ 34.003–90. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990.

6. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1989.

7. Ахметов, Р. Н. Оценка автономности низкоорбитальных КА ДЗЗ. [Текст] / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2009. - №10. - С. 7-14.

8. Ахметов, Р. Н. Принципы управления космическими аппаратами мониторинга Земли в аномальных ситуациях [Текст] / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Информационно - управляющие системы. – 2012. - №1. - С. 16-22.

PECULIARITIES OF EARTH OBSERVATION SPACE VEHICLE CONTROL IN CONTINGENCIES

© 2012 R. N. Akhmetov, V. P. Makarov, A. V. Sollogub

State Research and Production Space Center «TsSKB-Progress», Samara

The problem of Earth observation space vehicle control in contingencies is posed. Survivability behavior of unmanned spacecraft is defined. The principles of constructing a system for space vehicle survivability control are discussed.

Space vehicle, Earth observation, contingencies, target efficiency indicators, point of singularity and bifurcation.

Информация об авторах

Ахметов Равиль Нургалиевич, доктор технических наук, генеральный конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: проектирование и испытания ракетно-космической техники.

Макаров Валентин Павлович, доктор технических наук, научный советник, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: системы управления движением космических аппаратов.

Соллогуб Анатолий Владимирович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: моделирование ракетно-космических систем.

Akhmetov Ravil Nurgalievich, doctor of engineering science, General Designer, Space Rocket Center «TsSKB-Progress». E-mail: csdb@samspace.ru. Area of research: designing and testing of space rocket systems.

Makarov Valentin Pavlovich, doctor of engineering science, scientific adviser, Space Rocket Center «TsSKB-Progress». E-mail: csdb@samspace.ru. Area of research: space vehicle motion control systems.

Sollogub Anatoliy Vladimirovich, doctor of engineering science, chief scientific adviser, Space Rocket Center «TsSKB-Progress». E-mail: csdb@samtel.ru. Area of research: modeling of space rocket systems.