

УДК 629.78

## Модель функционирования реконфигурируемой бортовой вычислительной системы космического аппарата в условиях ее структурно-параметрической деградации

Захаров И. В., Забузов В. С., Кузнецов В. В.

**Введение.** Построение достаточно адекватных моделей реконфигурируемых бортовых вычислительных систем (БВС) перспективных космических аппаратов (КА) требует совокупного учета ряда факторов. Основными из них являются структурная, функциональная и параметрическая неоднородность подобных систем, их многофункциональность, влияние внешних неблагоприятных факторов и переменной нагрузки на выработку ресурса элементами системы, наличие множества частично работоспособных состояний. Это вызывает необходимость совершенствования научно-методического аппарата анализа реконфигурируемых вычислительных систем. **Цель.** Разработка модели функционирования БВС КА, обладающей более высокой адекватностью по сравнению с известными, на основе учета деструктивных физических процессов при меняющихся режимах работы элементов реконфигурируемой системы и воздействиях среды, и оценивания целевого эффекта ее применения в меняющихся условиях. **Новизна.** Разработанная имитационно-аналитическая модель отличается от известных представлением функционирования БВС зависимостью качества выполнения функций от выработки ее ресурса при деструктивных физических процессах с учетом режимов работы элементов и характеристик внешних воздействий. **Результат.** Построение модели функционирования реконфигурируемой БВС КА в условиях структурно-параметрической деградации включает этапы оценивания целевого эффекта применения БВС в зависимости от ее производительности, оценивание производительности БВС в текущей конфигурации и моделирование структурно-параметрической деградации БВС в процессе применения. В качестве ресурсов рассматриваются ресурс надежности, ресурс по накопленной дозе ионизирующих излучений космического пространства, ресурс по стойкости к тяжелым заряженным частицам и высокоэнергетическим протонам космического пространства, электроэнергетический ресурс, ресурс по стойкости к внезапным деструктивным воздействиям. Введенные показатели эффективной производительности и эффективного объема вычислений отражают влияние БВС на целевой эффект применения КА дистанционного зондирования Земли, в частности, его динамическую и интегральную производительность. **Практическая значимость.** Разработанная модель носит имитационно-аналитический характер и реализована в среде MatLab 7. Представляется достаточно открытой для агрегирования с моделями функциональных возможностей элементов, их надежности, стойкости и защищенности от внешних воздействий, моделями внешних воздействий различной природы, характеристиками вычислительных задач и режимов функционирования КА, моделями диспетчеризации вычислительных процессов. Использована при разработке методов синтеза структуры и управления перспективных реконфигурируемых БВС КА.

**Ключевые слова:** бортовая вычислительная система, реконфигурируемая система, ресурс, деградация, факторы космического пространства.

### Библиографическая ссылка на статью:

Захаров И. В., Забузов В. С., Кузнецов В. В. Модель функционирования реконфигурируемой бортовой вычислительной системы космического аппарата в условиях ее структурно-параметрической деградации // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 176-195. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/09-Zakharov.pdf>.

### Reference for citation:

Zakharov I. V., Zabuzov V. S., Kuznetsov V. V. Model of the reconfigurable on-board spacecraft computer system functioning under its structural-parametric degradation conditions. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 176-195. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/09-Zakharov.pdf> (in Russian).

## Введение

Насущная необходимость автономного управления космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в различных условиях обстановки ведет к повышению сложности и объема задач, которые должны быть решены вычислительными средствами их бортовых комплексов управления (БКУ). Это приводит к проблеме совершенствования структуры и алгоритмов функционирования бортовых вычислительных систем (БВС). Одним из наиболее перспективных подходов к решению указанной проблемы является построение БВС из неоднородных по функциональным возможностям компонентов на основе современных технологий, связанных с развитием электронной компонентной базы (ЭКБ) и коммуникационных стандартов, при сочетании преимуществ централизованного и децентрализованного управления. Это предполагает автономную самореконфигурацию БВС посредством гибкого управления режимами работы компонентов и диспетчеризации вычислительного процесса на основе прогнозирования ее состояния с учетом анализа ресурса и условий функционирования [1].

Однако анализ существующего научно-методического аппарата построения и управления БВС КА выявил его существенные ограничения, не позволяющие полноценно реализовать преимущества предложенного подхода [2]. Так, модели и методы общей теории надежности, теории живучести сложных систем, теории вычислительных систем, теории реконфигурируемых систем проработаны достаточно глубоко, однако основной вопрос – сложность их совместного применения – решен только для ограниченного числа частных случаев, поскольку композиция предлагаемых моделей и методов оказывается крайне трудоемкой. В частности, известные модели не позволяют одновременно учитывать разнообразие элементов по стойкости к возмущающим факторам, их месту в структуре системы и динамике характеристик функционирования. Как правило, модели, достаточно адекватно учитывающие характеристики разнородных элементов, являются по сути статическими, а динамические модели ограничиваются рассмотрением кратности отказов. Модели деградации сложных систем отражают лишь ее структурно-функциональный аспект, в то время как для анализа живучести системы более высокого уровня необходимы модели параметрической деградации ее элементов. В результате существующие модели вычислительных систем отражают, как правило, частные аспекты функционирования. В то же время моделирование самореконфигурируемой БВС КА в условиях действия возмущающих факторов различной природы требует совокупного учета следующих ее основных свойств [3]:

- структурной, функциональной и параметрической неоднородности;
- самореконфигурируемости системы – изменения режимов работы элементов и потока задач по определенному алгоритму в процессе функционирования;
- динамического многофакторного характера внешней среды;
- совместного влияния внешних воздействующих факторов и переменной нагрузки на выработку ресурса элементами системы;

- многофункциональности системы, требующей рассматривать качество реализации множества функций в частично работоспособных состояниях.

Отмеченные особенности объекта моделирования приводят к тому, что получение аналитических решений представляется возможным лишь для относительно простых систем – с небольшим числом элементов, или же однородных. Анализ многоэлементных систем со сложной неоднородной структурой базируется на имитационном моделировании. При этом следует указать, что невысокую эффективность имитационных моделей для высоконадежных элементов и систем не следует считать весомым недостатком при анализе объектов, функционирующих в условиях деструктивных воздействий (ДВ) и различного рода неопределенностей, таких как БВС КА. Указанные предпосылки и определяют в конечном итоге ее имитационно-аналитический характер.

Классический подход к моделированию случайных отказов по известным условиям функционирования и параметрам надежности состоит в том, что строится закон распределения времени до отказа, разыгрываются моменты времени отказов, и формируется описание процесса смены состояний. Существенное ограничение данного подхода заключается в том, что при изменяющихся условиях функционирования, в том числе в зависимости от состояния системы по ее внутреннему алгоритму поведения, законы распределения случайных времен отказов практически не получить. Кроме того, налицо необходимость сужения разнообразия внешней среды за счет универсализации описания воздействий. Поэтому для построения модели использован ресурсный подход, заключающийся в моделировании стохастического запаса ресурса элементов и его расхода в процессе функционирования системы по заданным функциям динамических параметров.

### **Структура модели функционирования реконфигурируемой бортовой вычислительной системы**

В достаточно общем случае будем считать, что заданы следующие исходные данные.

1. Структура  $S$  БВС задается как множество вычислительных (ВМ) и интерфейсных (ИМ) модулей  $\langle \zeta_i | j = 1 \dots N \rangle$  быстродействием  $v_i(g_j)$ , где  $g_j$  – режим работы элемента  $\zeta_i$ ,  $G = \langle g_i | i = 0, \dots, N \rangle$  – аппаратная конфигурация, и параметрами ресурса  $F_i$  (рассматриваются ниже). Связи в структуре  $S$  описаны матрицей смежности:

$$\|s_{ij}\|_{N \times N}, s_{ij} = \begin{cases} 0, & \zeta_i \text{ не связан с } \zeta_j; \\ 1, & \zeta_i \text{ связан с } \zeta_j. \end{cases}$$

2. Множество компонентов взаимодействующей с БВС бортовой аппаратуры (БА) КА  $A = \{a_i | i = 1 \dots \text{card}A\}$ .

3. Параметры внешних воздействий  $H = \langle V, \vec{h} \rangle$ .

Множество сценариев деструктивных воздействий (ДВ)  
 $V = \{V_j | j = 1 \dots \text{card}V\}$ ,  $V_j = \langle \vec{p}^{(j)}; k_{\text{эс}}^{(j)}; k_{\text{стр}}^{(j)}; \mu_j(t); \gamma_j \rangle$ , где  $\vec{p} = \langle p_k | k = 1, \dots, N \rangle$  – вероятности выхода из строя элементов структуры;  $k_{\text{эс}}^{(j)}$ ,  $k_{\text{стр}}^{(j)}$  – коэффициенты повреждения системы электроснабжения (СЭС) и системы обеспечения теплового режима (СОТР), в случае его реализации;  $\mu_j(t)$  – интенсивность случайного события реализации ДВ,  $\gamma_j$  – весовой коэффициент значимости ДВ.

Множество параметров факторов космического пространства  $\vec{h}(t)$ .

4. Множество вычислительных задач, решаемых БВС  
 $\Omega = \{\omega_i | i = 1 \dots \text{card}\Omega\}$ ;  $\omega_i = \langle \lambda_i, q_i^s, q_i^o, q_i^c, T_i, \beta_i \rangle$ , где  $\lambda_i$  – интенсивность потока задач  $i$ -го типа;  $q_i^s$  – объем задачи при решении ее на специализированном ВМ,  $q_i^o$  – на неспециализированном ВМ;  $q_i^c$  – объем данных задачи, передающихся по интерфейсам;  $T_i$  – директивное время решения;  $\beta_i$  – коэффициент критичности. Заданы коэффициент вариации  $V_\Omega$  времени выполнения задачи на ВМ или ИМ, а также средняя длительность интервала  $\tau$  решения вычислительных задач, необходимого для зондирования некоторого условного объекта (маршрута).

5. Множество функциональных режимов (ФР) БВС  
 $\Xi = \{\xi_k | k = 1 \dots \text{card}\Xi\}$ ,  $\xi_k = \langle \Omega_k, C_k, A_k \rangle$ , определяющих набор задач  $\Omega_k$ ; коэффициент ценности режима  $C_k$  (рассматривается ниже); множество компонентов БА  $A_k = \{a_i | i = 1 \dots \text{card}A_k\}$ ,  $A_k \subseteq A$ , необходимых в данном режиме.

Матрица специализации задач и ВМ

$$\|\pi_{ij}\|_{N \times m}, \pi_{ij} = \begin{cases} 0, & \zeta_i \text{ не специализирован для } \omega_i; \\ 1, & \zeta_i \text{ специализирован для } \omega_i. \end{cases}$$

6. Правило конфигурирования БВС  $\Phi_U : (A, H, R) \rightarrow \langle G, \xi \rangle$ .

Требуется найти зависимость  $J(t | MS)$  достигаемого целевого эффекта от времени при заданных параметрах  $MS = \langle S, \Omega, \Xi, A, H, \Phi_U \rangle$ .

Структура модели схематично представлена на рис. 1. Задача построения указанной модели решается в три этапа: оценивание производимого целевого эффекта при применении БВС в зависимости от ее текущей производительности, оценивание производительности БВС в текущей конфигурации и моделирование структурно-параметрической деградации БВС в процессе функционирования. При этом будем различать два аспекта конфигурирования: аппаратную (параметрическую) конфигурацию, определяющую режимы работы элементов БВС, и функциональную конфигурацию (функциональный режим), задающую набор решаемых задач. Под режимом работы элемента будем понимать управляемый параметр, определяющий физические процессы и их характеристики при функционировании того или иного элемента, например: тактовая частота, напряжение питания, периодичность включений, период регенерации памяти и

т.п. Пример обобщенной структуры БВС рассматриваемого класса приведен на рис. 2.

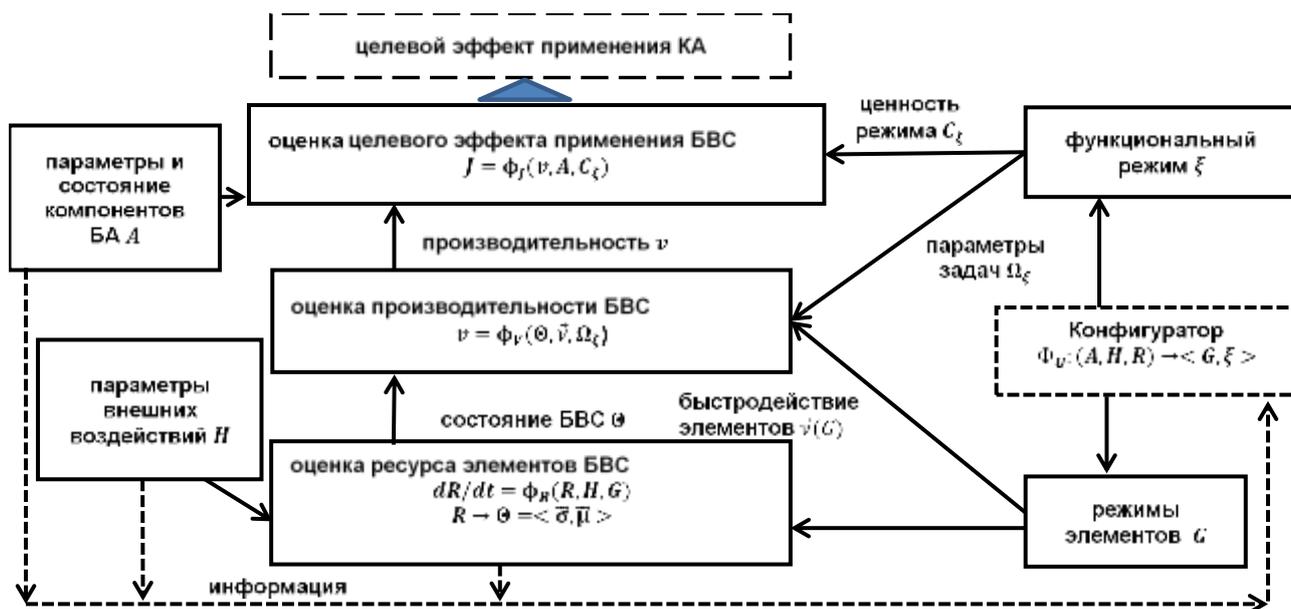


Рис. 1. Структура модели реконфигурируемой БВС КА ДЗЗ

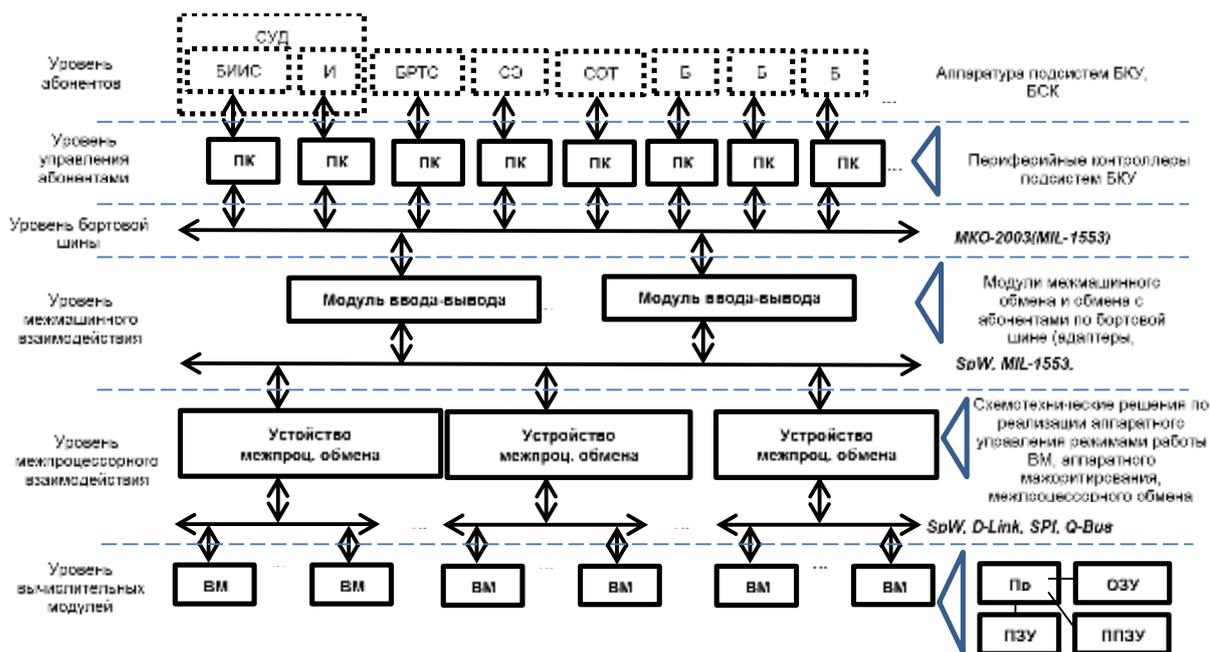


Рис. 2. Обобщенная структура БВС КА ДЗЗ

### Оценивание целевого эффекта применения бортовой вычислительной системы космического аппарата дистанционного зондирования Земли

Рассмотрим взаимосвязь производительности БВС с целевыми показателями применения КА на примере задач ДЗЗ. Обозначим через  $\Delta L(t)$  динамическую производительность,

$L = \int_0^{T_{сac}} \Delta L(t) dt$  – интегральную производительность,

$T_{\text{сac}}$  – срок активного существования КА ДЗЗ [4]. С другой стороны, определим показатель целевого эффекта применения БВС КА ДЗЗ как

$$\Delta J = \frac{P_{\text{дц}}(I)}{P_{\text{дц}}(I^{\text{НОМ}})} \frac{\Delta L}{T^{\text{в}}} K^{\text{ог}},$$

где  $P_{\text{дц}}(I)$  – вероятность достижения цели зондирования в режиме, обеспечивающем информативность зондирования  $I$ ,  $I^{\text{НОМ}}$  – номинальная (заданная требованиями для штатного режима функционирования КА) информативность;  $K^{\text{ог}}$  – коэффициент оперативной готовности КА при решении задачи зондирования;  $T^{\text{в}}$  – средняя длительность витка.

Пусть БВС КА ДЗЗ при выполнении задач зондирования находится в функциональном режиме (ФР)  $\xi$ , под которым будем понимать совокупность параметров процесса выполнения БВС заданного комплекса вычислительных задач, соответствующего режиму функционирования КА и параметрам соответствующих целевых задач на заданном интервале времени. Введем обозначения:

$w_{\xi} = \frac{P_{\text{дц}}(I_{\xi})}{P_{\text{дц}}(I_{\xi}^{\text{НОМ}})}$  – коэффициент информативности зондирования,  $\Delta L_{\xi}$  – динамическая производительность КА,  $K_{\text{бкы}}^{\text{ог}}$  – коэффициент оперативной готовности БКУ без учета БВС. Тогда  $\Delta J = w_{\xi} \cdot \frac{\Delta L_{\xi}}{T^{\text{в}}} \cdot K_{\text{бкы}}^{\text{ог}}$ , где  $P(\xi)$  – вероятность решения БВС задач на интервалах, обеспечивающих зондирование независимых объектов (площадок, маршрутов).

Введем величину  $K_{\text{крит}}^{\text{ог}}(\xi)$ , представляющую собой коэффициент, отражающий влияние критически важных задач. Вычислим  $K_{\text{крит}}^{\text{ог}}(\xi) = 1 - \frac{kP_{\text{крит}}(\xi)}{1 - kP_{\text{крит}}(\xi)} \approx 1 - kP_{\text{крит}}(\xi)$ , где  $P_{\text{крит}}(\xi)$  – вероятность срыва решения БВС критической задачи в режиме  $\xi$ ,  $k$  – коэффициент, равный отношению средней интенсивности поступления критической задачи к средней интенсивности восстановления функционирования после ее срыва (например, на каждом витке решается набор критически важных фоновых задач, срыв которых влечет тяжелые последствия, требующие вмешательства наземного комплекса управления и восстановления штатного функционирования КА в течение нескольких витков). Введем показатель вычислительной мощности БВС  $\nu(\xi) = \lambda(\xi) \cdot P(\xi) \cdot [1 - kP_{\text{крит}}(\xi)]$ , где  $\lambda(\xi)$  – средняя интенсивность потока вычислительных задач, поступающих для решения в БВС, выраженная в единицах быстродействия (MIPS, MFLOPS). Назовем коэффициентом ценности режима величину  $C_{\xi} = \frac{w_{\xi} \cdot \Delta L_{\xi} \cdot K_{\text{бкы}}^{\text{ог}}}{T^{\text{в}} \cdot \lambda(\xi)}$ , тогда показатель целевого эффекта применения БВС в ФР  $\xi$  – «эффективная производительность» – будет выражен как

Введем величину  $K_{\text{крит}}^{\text{ог}}(\xi)$ , представляющую собой коэффициент, отражающий влияние критически важных задач. Вычислим

$K_{\text{крит}}^{\text{ог}}(\xi) = 1 - \frac{kP_{\text{крит}}(\xi)}{1 - kP_{\text{крит}}(\xi)} \approx 1 - kP_{\text{крит}}(\xi)$ , где  $P_{\text{крит}}(\xi)$  – вероятность срыва решения БВС критической задачи в режиме  $\xi$ ,  $k$  – коэффициент, равный отношению средней интенсивности поступления критической задачи к средней интенсивности восстановления функционирования после ее срыва (например, на каждом витке решается набор критически важных фоновых задач, срыв которых влечет тяжелые последствия, требующие вмешательства наземного комплекса управления и восстановления штатного функционирования КА в течение нескольких витков). Введем показатель вычислительной мощности БВС

$\nu(\xi) = \lambda(\xi) \cdot P(\xi) \cdot [1 - kP_{\text{крит}}(\xi)]$ , где  $\lambda(\xi)$  – средняя интенсивность потока вычислительных задач, поступающих для решения в БВС, выраженная в единицах быстродействия (MIPS, MFLOPS). Назовем коэффициентом ценности режима

величину  $C_{\xi} = \frac{w_{\xi} \cdot \Delta L_{\xi} \cdot K_{\text{бкы}}^{\text{ог}}}{T^{\text{в}} \cdot \lambda(\xi)}$ , тогда показатель целевого эффекта применения

БВС в ФР  $\xi$  – «эффективная производительность» – будет выражен как

$\Delta J(\xi) = C_{\xi} \cdot v(\xi)$ . Смысл задаваемого коэффициента ценности режима в том, что он соотносит влияние выполненного БВС комплекса вычислительных задач с целевым эффектом применения КА при выполнении данной целевой задачи.

Для оценивания целевого эффекта БВС требуется учет состояния систем КА, влияющих на эффективность применения БВС. Соотношение реализуемости ФР с состоянием функционально связанных компонентов бортовой аппаратуры выражается в виде  $A = \{a_i | i = 1 \dots \text{card}(A)\}$ ;  $\Xi \times A \rightarrow \Xi^* : \Xi^* \subseteq \Xi$ ;  $\xi_i \in \Xi^*$ ,  $A \subseteq A_i$ ;  $\xi_i \notin \Xi^*$ ,  $A \not\subseteq A_i$ . Суть данного соображения состоит в том, что в определенных состояниях КА не все ФР могут быть реализованы (очевидно, вплоть до того, что функционирование БВС не имеет смысла при выходе из строя БКУ или КА в целом). Смысл выбора ФР можно проиллюстрировать следующим примером. При отказах вычислительных компонентов БВС может быть целесообразным повышение ее производительности за счет надежности решения задач, в то время как в штатном режиме, при наличии запаса производительности, используется резервирование и двойной-тройной просчет в целях повышения устойчивости к сбоям. Далее, в ряде ситуаций на борту КА может требоваться реализация алгоритмической и информационной избыточности вычислений, т.е. увеличение производительности БВС. Напротив, при деградации БВС могут быть выполнены менее ресурсоемкие режимы, обеспечивающие решение целевых задач КА хотя бы с приемлемым снижением качества. Поэтому в качестве эффективной производительности следует выбрать ее наибольшее значение по множеству ФР  $\Xi^* \subseteq \Xi$ , реализуемых в текущем состоянии БВС и БА:

$$\Delta J^* = \max_{\xi_i \in \Xi^*} \Delta J(\xi), \quad \xi^* = \arg \max_{\xi_i \in \Xi^*} \Delta J(\xi_i).$$

С учетом принятых допущений при прочих равных условиях эффективная производительность является величиной, пропорциональной динамической производительности КА ДЗЗ. Эффективным объемом вычислений, пропорциональным интегральной производительности КА ДЗЗ за срок  $T_{\text{сac}}$ , назовем величину  $J = \int_0^{T_{\text{сac}}} \Delta J(t) dt$ . Таким образом, эффективный объем вычислений представляет собой аддитивную величину, соотносящую выполнение БВС на некотором интервале времени вычислительных задач с целевым эффектом применения КА ДЗЗ, зависящую от комплекса вычислительных задач, состояния бортовой аппаратуры КА, потребности в зондировании объектов и маршрутов, фоноцелевой обстановки и т.д. Поскольку их значения зависят от множества факторов, для оценки качества функционирования БВС используем динамический коэффициент эффективности

$$\aleph(t) = \frac{\Delta J^*(t)}{P_{\text{дц}}(I^{\text{ном}}) \Delta LK_{\text{бкы}}^{\text{ог}}(t)}$$

и интегральный коэффициент эффективности

$$\aleph_{\infty} = \frac{J}{J_{\infty}} = \frac{\int_0^{T_{\text{сac}}} \Delta J^*(\tau) d\tau}{P_{\text{дц}}(I^{\text{ном}}) \Delta L \int_0^{T_{\text{сac}}} K_{\text{бкы}}^{\text{ог}}(\tau) d\tau}.$$

Указанные коэффициенты представляют собой отношения эффективной производительности и эффективного объема вычислений для данной БВС к этим величинам для гипотетической БВС, обладающей сколь угодно большой производительностью и сколь угодно малой ресурсоемкостью, в данных условиях.

### Оценивание производительности бортовой вычислительной системы

В целом подход к оцениванию производительности неоднородной иерархически-сетевой БВС, учитывающей разнородность задач по ресурсоемкости и критичности, рассмотрен в [5]. Он учитывает разнообразие задач и алгоритмы диспетчеризации, т.е. распределение потока задач по ВМ. Также в [5] обосновано применение показателя вычислительной способности БВС, равного ожидаемому числу успешно решаемых задач в единицу времени с учетом их критичности по директивному сроку выполнения, с учетом перемежающихся отказов. Здесь для краткости изложения уделено внимание оцениванию производительности при обобщенных параметрах набора задач в текущей конфигурации БВС. Принятые допущения кратко обосновываются следующими соображениями. Во-первых, для КА определенного целевого назначения (в частности, ДЗЗ) можно выделить конечное число определенных режимов функционирования, следовательно, для БВС можно ограничить типовые наборы задач и определить их параметры. Типовой характер задач и высокая степень отработанности бортового программного обеспечения позволяют связать быстродействие узлов и ресурсоемкость задач случайной величиной времени выполнения задачи, имеющей усеченное нормальное распределение с определенным коэффициентом вариации  $V_{\Omega}$ . Вычислительные задачи поступают в БВС КА ДЗЗ от значительного количества абонентов, и имеют несколько уровней приоритета [4], что позволяет считать их поток простейшим. Широкое внедрение таких средств повышения устойчивости вычислительных процессов, как точки отката, сторожевые таймеры и т.п., позволяет считать достаточно корректным оговоренное выше усреднение параметров задач для конкретного режима работы БВС.

Уровень конвергенции бортовых информационно-вычислительных ресурсов КА, отражающий возможность использования специализированных модулей для решения общих задач и централизованного решения специализированных задач, учитывается в ресурсоемкости задач. Кроме того, параметры задач учитывают их репликацию в соответствующих режимах, обеспечивающую обнаружение и исправление ошибок (например, широко используемое программно-аппаратное мажоритирование) и связность результатов задач.

Процесс решения задачи представляется в виде ее прохождения последовательности обслуживающих устройств от нулевого уровня иерархически-сетевой структуры БВС (уровня ВМ) до вершины, последовательно через ИМ

промежуточных уровней. Время решения задачи в БВС определяется суммой времен выполнения задачи назначенными узлами, которые складываются из случайного времени ожидания, зависящего от производительности и нагрузки узла, и времени непосредственного решения, зависящего от производительности узла и ресурсоемкости задачи. В силу принятого выше допущения модель процессорного или интерфейсного узла представима как система массового обслуживания типа  $M/G/1$ . Поскольку ИМ рассматриваются в составе структуры как узлы, время перехода задачи от узла к узлу будем считать мгновенным. Для определенности примем допущение, что диспетчеризация обеспечивает равномерное в смысле коэффициента нагрузки распределение задач по ВМ.

Суммарная интенсивность потока задач, поступающих в БВС на решение, составляет  $\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ ,  $\lambda_i = \gamma_i \lambda$ , где  $m$  – число типов задач. В соответствии с входными параметрами модели задачи и ВМ разбиваются на множества  $\Pi \rightarrow \{A_k\}, \{B_k\} : \pi_{ij} = 1 \Leftrightarrow i \in A_k, j \in B_k$ , что отражает специализацию ВМ и задач.

Обозначим средние объемы задач по типам как  $\bar{q}^c = \sum_{i=1}^m q_i^c$ ,  $\bar{q}^s = \sum_{i=1}^m q_i^s$ ,

$$\bar{q}^o = \sum_{i=1}^m q_i^o.$$

Сделаем следующее допущение. Если текущее состояние и конфигурация БВС таковы, что суммарная интенсивность потока всех задач  $k$ -го типа превышает суммарное быстродействие ВМ  $k$ -го типа, образуется дополнительный объем вычислений  $\Delta Q_k$ , который необходимо выполнить в системе:

$$\sum_{i \in A_k} q_i^s \lambda_i > \sum_{j \in B_k} v_j :$$

$$\Delta Q_k = \left( \sum_{i \in A_k} q_i^s \lambda_i - \sum_{j \in B_k} v_j \right) \frac{\sum_{i \in A_k} q_i^o \lambda_i}{\sum_{i \in A_k} q_i^s \lambda_i} = \left[ 1 - \frac{\sum_{j \in B_k} v_j}{\sum_{i \in A_k} q_i^s \lambda_i} \right] \cdot \sum_{i \in A_k} q_i^o \lambda_i ;$$

$$\sum_{i \in A_k} q_i^s \lambda_i \leq \sum_{j \in B_k} v_j : \Delta Q_k = 0.$$

В результате средняя нагрузка ВМ оценивается величиной  $\bar{\rho}_{\text{ВМ}} = \frac{\sum_{i=1}^m q_i^s \lambda_i + \sum_k \Delta Q_k}{\sum_{j=1}^n v_j}$ , а средний объем задач, решаемых на ВМ, составит

$\bar{q} = \frac{\bar{\rho}_{\text{ВМ}}}{\lambda}$ , откуда получим среднее время решения задачи на ВМ  $b_j = \frac{\bar{q}}{v_j}$ ,  $j = 1, \dots, n$ , где  $n$  – количество ВМ.

Из соображения равномерного в смысле коэффициента нагрузки распре-

деления задач интенсивность потока задач на ВМ составит  $\Lambda_j = \bar{\rho}_{\text{ВМ}} \cdot \frac{v_j}{\bar{q}}$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Отсюда, объединяя входящие потоки, с учетом заданной матрицы смежности  $\|s_{ij}\|_{N \times N}$  получим интенсивности потоков задач по ИМ  $\Lambda_k = \sum_{j:s_{ij}=1} \Lambda_j$ ,  $k = n + 1, \dots, N$ , и среднюю нагрузку ИМ:  $v_k > 0: \bar{\rho}_k = \frac{\bar{q}^c \cdot \Lambda_k}{v_k}$ ;  $v_k \leq 0: \bar{\rho}_k = 0$ , откуда среднее время решения задачи на ИМ составит  $b_k = \frac{\bar{q}^c}{v_k}$ ,  $k = n + 1, \dots, N$ .

В результате математическое ожидание  $d_{ik}^*$  и коэффициент вариации  $V_{ik}$  времени выполнения задачи  $\omega_i$  на узле  $k$  с учетом ожидания оцениваются на основе формулы Поллачека–Хинчина [6]:

$$d_{ik}^* = w_k + b_{ik}, \quad w_k = \frac{\bar{\rho}_k b_k (1 + V_{\Omega}^2)}{2(1 - \bar{\rho}_k)}, \quad V_{ik} = 1 + 2\bar{\rho}_k V_{\Omega}^2 - 2\bar{\rho}_k (1 - \bar{\rho}_k) \frac{w_k}{b_{ik}},$$

$$b_{ik} = \frac{q_i^c}{v_k}, \quad b_k = \frac{\bar{q}^c}{v_k}, \quad k = n + 1, \dots, N; \quad b_{ik} = \frac{1}{v_k} \left( q_i^s \left( 1 - \frac{\Delta Q}{Q} \right) + q_i^o \frac{\Delta Q}{Q} \right),$$

$$b_k = \frac{1}{v_k} \left( \bar{q}^s \left( 1 - \frac{\Delta Q}{Q} \right) + \bar{q}^o \frac{\Delta Q}{Q} \right), \quad k = 1, \dots, n.$$

Среднее время выполнения задачи  $\omega_i$  по  $l$ -му уровню и его среднеквадратическое отклонение составят  $\bar{d}_{(l)i} = \frac{\gamma_i}{\lambda} \cdot \sum_{j=n_{l-1}+1}^{n_l} \Lambda_j d_{ij}$ ,  $\bar{\sigma}_{(l)i} = \frac{\gamma_i}{\lambda} \sqrt{\sum_{j=n_{l-1}+1}^{n_l} \Lambda_j \sigma_{ij}^2}$ .

В итоге математическое ожидание  $\bar{t}_i$  и среднеквадратичное отклонение  $\bar{\sigma}_i$  времени выполнения задачи  $\omega_i$  в БВС может быть найдено из соотношений

$$\bar{t}_i = \sum_{l=0}^u \bar{d}_{(l)i}, \quad \bar{\sigma}_i = \sqrt{\sum_{l=0}^u \bar{\sigma}_{(l)i}^2}.$$

Отсюда вероятность  $p_i$  выполнения задачи  $\omega_i$  за директивный срок  $T_i$  вычисляется как  $p_i = P\{\hat{t}_i \leq T_i\} = \frac{1}{2} + \Phi_0\left(\frac{T_i - \bar{t}_i}{\bar{\sigma}_i}\right)$ , где  $\Phi_0$  – функция Лапласа. Вероятность успешного решения всех задач на интервале  $\tau$  составит  $P = \prod_{i=1}^m p_i^{\beta_i \gamma_i \lambda \tau}$ .

Однако полученные величины не отражают в явном виде их зависимость от входного потока задач и состояния системы, характеризуя в большей степени саму задачу. Напротив, такие общепринятые показатели, как номинальное быстродействие, пиковая пропускная способность и т.д. достаточно адекватно отражают производительность лишь простейших устройств. Поэтому в [5] обоснована и использована для оценивания эффективной производительности

БВС вычислительная способность как  $v = \lambda \sum_{i=1}^m \gamma_i p_i^{\beta_i}$ , где  $\beta_i$  – коэффициент критичности задачи. При этом вычислительная мощность  $v_0 = \max_{\lambda} v(\lambda)$  является

для вычислительной системы при заданном наборе задач характерным показателем и позволяет свернуть в один показатель быстродействие узлов, объем задач и их директивные сроки. Поэтому, переходя к БВС сложной структуры и потоку множества задач, для решения вопросов анализа и синтеза динамических структур и конфигураций БВС целесообразно использовать предложенный показатель как достаточно универсальный, учитывающий и быстродействие узлов, и параметры решаемых задач.

Следует отметить, что теория массового обслуживания в настоящее время глубоко проработана и содержит широкий спектр достаточно апробированных методов оценивания производительности сложных вычислительных систем и сетей. Однако их основной недостаток применительно к поставленной задаче заключается в сложности аналитических расчетов, в особенности для неоднородных систем, что оказывается неприемлемым при использовании разрабатываемой модели для решения задач автономного оперативного управления функционированием БВС на борту КА [7]. Предложенный подход, выглядящий с позиций теории массового обслуживания несколько грубым, обеспечивает, при весьма низкой вычислительной сложности, решение двух важных вопросов. Во-первых, учитывается иерархически-сетевая структура распределенной системы, требующая принять во внимание пропускную способность и состояние интерфейсов. (Зачастую в качестве показателя производительности выдвигают «суммарное быстродействие», равное сумме пиковых быстродействий процессоров, имеющих в системе, при их максимально допустимой тактовой частоте, что на практике трудно считать адекватной оценкой.) Во-вторых, вероятностный характер получаемой оценки позволяет перейти к вероятностной оценке решения целевой задачи КА. (Так, традиционно используются бинарные оценки качества функционирования БВС в том или ином состоянии – например, по критерию минимально требуемой производительности, в то время как в реальности запас производительности позволяет существенно повысить устойчивость вычислений, а снижение производительности в большинстве случаев означает не срыв задачи, а превышение заданного ограничения его вероятности.)

### **Оценивание структурно-параметрической деградации бортовой вычислительной системы**

Элементы системы, следовательно, и система в целом, в ходе функционирования расходуют свой ресурс. Расходование ресурса зависит как от среды, так и от режима работы (нагрузки) элемента, а также от уже выработанного ресурса. Идея ресурса применительно к надежности в классическом смысле предложена профессором Н.М.Седякиным [8]. В то же время очевидно, что при работе БВС расходует и ресурсы иной природы, например, электроэнергию. Стохастические процессы ДВ также можно описать в терминах расхода некоего ресурса. Таким образом, для достижения общности формализации условий функ-

ционирования БВС при совокупном учете воздействующих факторов обобщим понятие ресурса. Под ресурсом элемента (системы) будем понимать категорию, отражающую конкретный физический процесс или отдельный аспект функционирования, приводящий к выходу элемента (системы) из строя в течение конечного интервала времени, например, радиационную стойкость по накопленной дозе излучения, ресурс надежности, электроэнергию, количество перезаписей в ячейки flash-памяти и т.п.

Пусть элементы системы обладают расходуемым ресурсом, а типы ресурса обозначим через  $R^{(1)}, R^{(2)}, \dots, R^{(\ell)}$ . В момент времени  $t$  система характеризуется выработанным ресурсом  $R(t) = \{\vec{r}_i(t) | i=1, \dots, N\}$ , где выработанный ресурс  $j$ -го элемента описывается как  $\vec{r}_i(t) = \langle r_i^{(1)}(t), \dots, r_i^{(\ell)}(t) \rangle$ ,  $\vec{r}_i(0) = \vec{0}$ . Элементы системы обладают запасом ресурса  $U = \{\hat{u}_i | i=1, \dots, N\}$ , где  $\hat{u}_i = \langle \hat{u}_i^{(1)}, \dots, \hat{u}_i^{(\ell)} \rangle$

– запас ресурсов  $j$ -го элемента. Компоненты вектора запаса ресурса могут быть стохастическими либо детерминированными (в том числе бесконечно большими), и в общем случае могут изменяться в процессе функционирования системы.

Расход ресурса элемента  $\frac{d\vec{r}_i(t)}{dt}$  в момент времени  $t$  задается функцией расхода ресурсов

$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{\delta}_i[\vec{r}_i(t), g_i(t), H(t), \hat{z}];$   $g_i(t)$  – режим работы элемента,

$H(t)$  – характеристики воздействий внешней среды, что соотносится с расширением принципа Седякина профессором Х.Л. Смолицким [8]. В общем случае величина расхода ресурсов зависит от случайных факторов  $\hat{z}$ . Текущее состояние элемента в момент времени  $t$  задается в виде функции Хевисайда от остаточного ресурса:

$$\hat{\sigma}_i(t) = \prod_{j=1}^{\ell} \zeta[\hat{u}_i^{(j)}(t) - r_i^{(j)}(t)], \zeta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1, & x \geq 0. \end{cases}$$

Применительно к условиям функционирования БВС КА в орбитальном полете определим и опишем в качестве ресурсов элементов и их запасов следующие величины.

Ресурс надежности.  $R^{(1)}$  – ресурс надежности в смысле физического принципа Седякина;  $\hat{u}_i^{(1)} = -\ln \hat{\mathfrak{R}}$ , где  $\hat{\mathfrak{R}} \in [0; 1]$  – равномерно распределенная разыгрываемая случайная величина (СВ),  $\alpha$  – параметр формы распределения Вейбулла (положим  $\alpha = 1,75$  [9]),  $\Gamma$  – гамма-функция;

$$\delta_i^{(1)}(r_i^{(1)}) = K_i(g_i) \cdot \frac{\alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{T_i^H} \cdot [r_i^{(1)}]^{1 - \frac{1}{\alpha}}, T_i^H \text{ где – средняя наработка на от-}$$

каз в номинальном режиме;  $K_i(g_i) = \frac{f(g_i)}{f_0(g_i)} A e^{B[T + \varepsilon_i \cdot e(g_i)]}$  – коэффициент режима

работы,  $A, B$  – коэффициенты модели [10];  $\varepsilon_i$  – тепловое сопротивление элемен-

та;  $e$  – потребляемая электрическая мощность;  $f, f_0$  – текущая и номинальная тактовая частота соответственно;  $T = T_0 + k_T^{\text{дегр}} \cdot \Delta T$ , где  $k_T^{\text{дегр}}$  – коэффициент деградации СОТР,  $\Delta T$  – величина нагрева блока аппаратуры БВС при выходе из строя СОТР при расчетной температуре  $T_0$ .

Радиационная стойкость по накопленной дозе.  $R^{(2)}$  – накопленная доза ионизирующего излучения космического пространства (ИИ);  
 $\hat{u}_i^{(2)} = \left(1 + V_D \cdot \sqrt{-2 \ln \hat{\mathcal{R}}_1} \cdot \cos 2\pi \hat{\mathcal{R}}_2\right) \cdot D_i^{\text{II}}$  [11], где  $D_i^{\text{II}} = \frac{D_i^{\text{CT}}}{1 - V_D \Phi_0^{-1}(p)}$  – поражающая

доза ИИ,  $D_i^{\text{CT}}$  – уровень стойкости по вероятности сохранения работоспособности  $p$  (положим  $p=0,95$ ; коэффициент вариации  $V_D=0,25$  согласно ОСТ 134-1034-2012),  $\Phi_0^{-1}$  – функция, обратная функции Лапласа;

$\delta_i^{(2)}(t) = k_D(g_i) \cdot P^{\text{ИИ}}(t)$ , где  $P^{\text{ИИ}}(t)$  – мощность поглощаемой дозы ИИ,  $k_D(g_i)$  – коэффициент, учитывающий зависимость деградации элемента вследствие ИИ от его электрической нагрузки  $g_i$ .

Энергоресурс.  $R^{(3)}$  – потребленная электроэнергия;  $u_i^{(3)} = E_a$  – величина резервной электроэнергии СЭС;  $\delta_{\text{бвс}}^{(3)}(t) = \tilde{\delta} \cdot \zeta [\tilde{\delta} - e_{\text{сэс}}]$ ,  $\tilde{\delta} = e_{\text{бс}}(\xi) + \sum_{i=1}^N e_i(g)$ , где  $e_i$  – потребляемая мощность элемента,  $e_{\text{бс}}(\xi)$  – мощность, потребляемая бортовыми системами КА при реализации режима  $\xi$ ,  $e_{\text{сэс}}$  – мощность системы электроснабжения;  $e_{\text{сэс}} = k_{\text{сэс}}^{\text{дегр}} \cdot e_{\text{сэс}}^{\text{н}}$ , где  $e_{\text{сэс}}^{\text{н}}$  – номинальная мощность СЭС,  $k_{\text{сэс}}^{\text{дегр}}$  – коэффициент деградации СЭС.

Радиационная стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) космического пространства.  $R^{(4)}$  – ресурс, характеризующий поглощенный поток ТЗЧ и ВЭП, вызывающих одиночные радиационные эффекты катастрофического характера с интенсивностью  $\mu_\phi(t)$ ;  $\hat{u}_i = -\ln \hat{\mathcal{R}}$ ;  $\hat{\delta}_i^{(4)} = k_\phi(g_i) \cdot \mu_\phi(t)$ , где  $k_\phi(g_i)$  – коэффициент, учитывающий зависимость опасности воздействия ТЗЧ и ВЭП от электрической нагрузки. Модель  $\mu_\phi(t)$  строится в соответствии с современными исследованиями стойкости ЭКБ, моделями космического пространства и нормативной базой (в частности, РД-134-0139-2005, и другими документами), и рассчитывается с учетом конструктивной защиты и компоновки аппаратуры.

При оценивании производительности БВС учитываются [6] перемежающиеся отказы элементов. Модель перемежающихся отказов задается в виде интенсивности сбоя  $i$ -го элемента, зависящей от расхода ресурса надежности (выработанного ресурса и коэффициента нагрузки), а также от радиационных факторов космического пространства:  $\mu_i = K_i^{(\mu\lambda)} \delta_i^{(1)} + K_i^{(\mu D)} \delta_i^{(2)} + K_i^{(\mu\phi)} \delta_i^{(5)}$ , где  $K_i^{(\mu\lambda)}$ ,  $K_i^{(\mu D)}$ ,  $K_i^{(\mu\phi)}$  – коэффициенты пропорциональности. Очевидно, рассматри-

ваемый при оценивании производительности БВС интервал времени достаточно мал, чтобы считать на нем поток сбоев элемента простейшим.

Ресурс элементов БВС по внезапным ДВ.  $R^{(x)}$  – ресурс по внезапным ДВ,  $u_i^{(x)}$  – вероятность выхода элемента из строя в случае ДВ  $V_\chi$ ; наличие события ДВ разыгрывается следующим образом:  $\mu_\chi \tau > \hat{\mathfrak{R}}$ : имеет место  $V_\chi$  на интервале

$$[t; t + \tau]; \hat{\delta}_i^{(x)} = \frac{\zeta(u_i^{(x)} - \hat{\mathfrak{R}}_1 \cdot \chi_i(g_i))}{\tau}, \chi_i(g_i) - \text{коэффициент учета режима нагрузки};$$

$\mu_\chi \tau \leq \hat{\mathfrak{R}}$ : не имеет место  $V_\chi$  на интервале  $[t; t + \tau]$ ;  $\hat{\delta}_i^{(x)} = 0$ .

Для оценивания целевого эффекта применения БВС, как изложено выше, требуется учет состояния систем КА. Поэтому рассматривается сокращение множества  $A = \{a_j | j = 1 \dots \text{card}(A)\}$  исправных компонентов бортовой аппаратуры:  $A \times H \rightarrow A^*$ :  $A^* \subseteq A$   $a_j \in A^*$ ,  $u_j^{(x)} \geq \hat{\mathfrak{R}}$ ;  $a_j \notin A^*$   $u_j^{(x)} < \hat{\mathfrak{R}}$ , если имело место ДВ  $V_\chi$  за интервал  $[t; t + \tau]$ ;  $u_j^{(x)} < \hat{\mathfrak{R}}$ ,  $u_j^{(x)} = p_j^{(x)}$  – вероятность выхода из строя  $j$ -го компонента БА при  $V_\chi$ .

Далее, введем в рассмотрение ресурс СЭС и СОТР. Обозначим  $R^{(s)} = 1 - k^{\text{дегр}}$ ,  $k^{\text{дегр}}$  – коэффициент деградации СЭС  $k_{\text{сэс}}^{\text{дегр}}$  или СОТР  $k_{\text{сотр}}^{\text{дегр}}$ ;  $u^{(s)} = 1$ . Будем считать  $\hat{\delta}^{(s)} = (1 - \hat{\eta})(1 - r^{(s)})$ , если имело место ДВ  $V_\chi$  за интервал  $[t; t + \tau]$ ;  $\hat{\delta}^{(s)} = 0$ , если нет;  $\hat{\eta}$  – случайный коэффициент деградации в результате ДВ  $V_\chi$ , имеющий математическое ожидание  $K$  и плотность распределения

$$f_\eta^{(x)}(x) = \frac{K}{1 - K} x^{\frac{2K-1}{1-K}}, x \in (0; 1]. \text{ Удобство такого распределения состоит в том,}$$

что оно, являясь однопараметрическим, при  $K = 0$  и  $K = 1$  сводит коэффициент деградации к детерминированному, а при  $K = \frac{1}{2}$  сводится к равномерному рас-

пределению. При этом отражен случайный характер повреждения некоторого количества элементов из их совокупности. Также следует учесть, что имеет место деградация СЭС в орбитальном полете за счет воздействия космической радиации, метеорных потоков, внутренних дефектов и т.д. Зависимость коэффициента деградации выходной мощности солнечных батарей достаточно хорошо описывается показательной зависимостью, поэтому положим  $k^{\text{дегр}}(t + dt) = k^{\text{дегр}}(t) \cdot (k_{\text{сac}}^{\text{дегр}})^{dt/T_{\text{сac}}}$ , где  $k_{\text{сac}}^{\text{дегр}}$  – расчетное значение коэффициента деградации за срок активного существования КА  $T_{\text{сac}}$  в штатных условиях.

Разработанная модель реализована в среде MatLab 7. Общая схема имитационно-аналитического моделирования кратко представлена на рис. 3. Результаты моделирования функционирования вариантов БВС на основе известных архитектур КА ДЗЗ, показывают, в частности, сложность обоснования критериев выбора структур и алгоритмов управления БВС в условиях деградации,

которые должны строиться на основе прогнозирования срока активного существования, учета условий функционирования и требований по выполнению целевых задач.

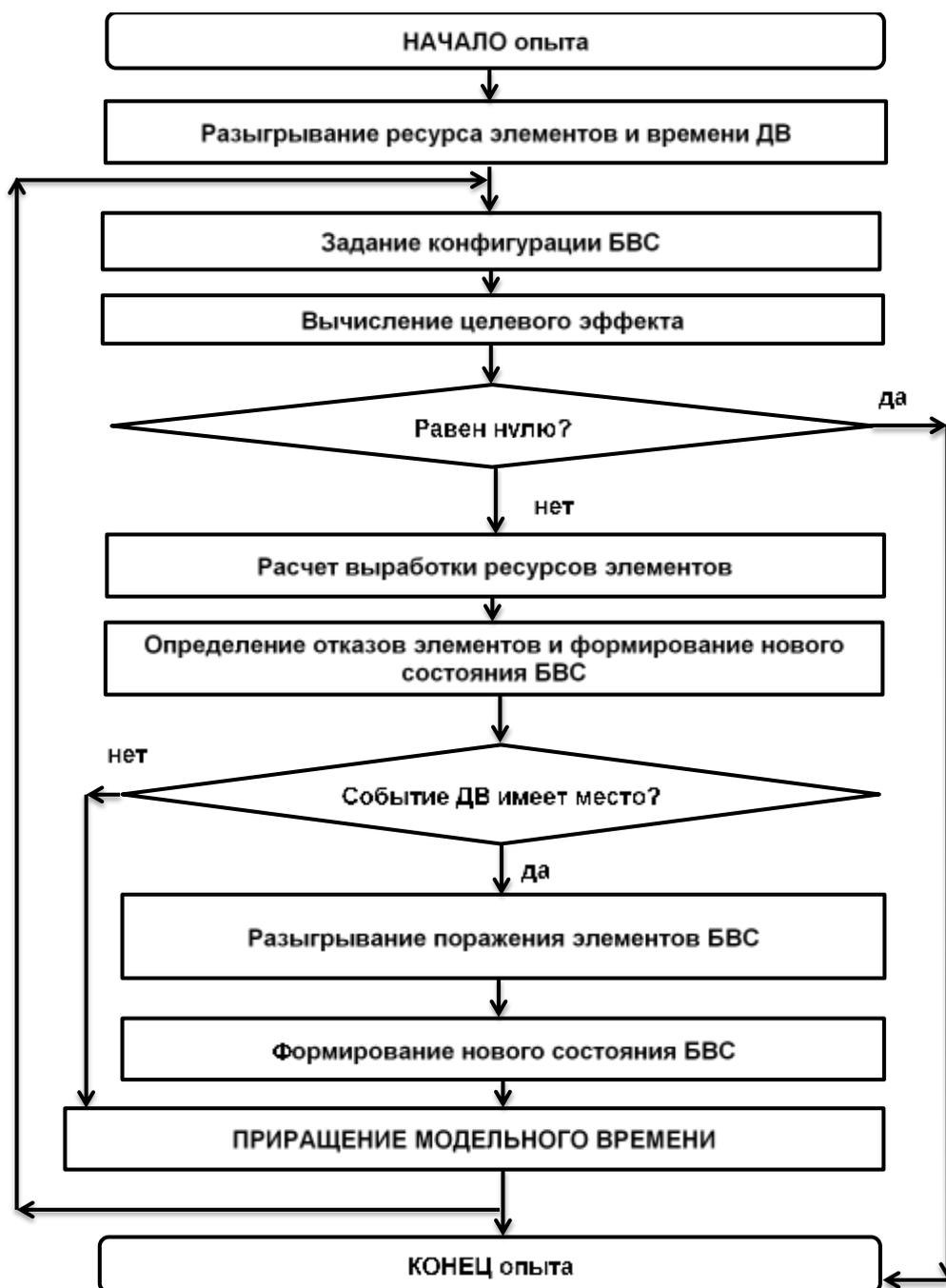


Рис. 3. Схема имитационно-аналитического моделирования функционирования БВС КА

Модель позволяет наблюдать и исследовать зависимость качества функционирования системы от вариантов конфигурирования. Полученные оценки демонстрируют непротиворечивость результатов моделирования и теоретических соображений по анализу многомодульных реконфигурируемых вычислительных систем. Так, в [13] представлен подход к оцениванию целевого эффекта реконфигурируемой БВС по показателю математического ожидания суммар-

ного быстрогодействия, и определению показателей надежности по вероятности суммарного быстрогодействия БВС не ниже требуемого. Проведено моделирование функционирования многомодульной БВС малого КА, описанной в [13], также с помощью разработанной модели. Среднеквадратическое отклонение оценок вероятностных показателей надежности при моделировании (для 250 тыс. опытов) не хуже 0,002. Сравнительный анализ показал на 11–15% меньшие по гамма-процентному ресурсу сроки функционирования БВС в условиях орбитального полета КА на низкой солнечно-синхронной орбите (56 тыс. ч против 63 тыс. ч и 84 тыс. ч против 99 тыс. ч по 95% и 90% гамма-процентному ресурсу соответственно), что подтверждается более низкими оценками надежности бортовых вычислительных средств КА по результатам их эксплуатации в сравнении с расчетно-аналитическими.

### Заключение

Решение вопросов оперативного автономного управления БВС КА посредством гибкого управления режимами работы компонентов и диспетчеризации вычислительного процесса на основе прогнозирования ее состояния с учетом анализа ресурса и условий функционирования требует совершенствования научно-методического аппарата анализа реконфигурируемых информационно-вычислительных систем. Построение имитационно-аналитической модели функционирования реконфигурируемой БВС КА в условиях структурно-параметрической деградации включает этапы оценивания целевого эффекта применения БВС в зависимости от ее текущей производительности, оценивание производительности БВС в текущей конфигурации, и моделирование структурно-параметрической деградации элементов БВС в процессе применения. Разработанная модель отличается от известных представлением функционирования БВС зависимостью качества выполнения функций от выработки ее ресурса при деструктивных физических процессах с учетом режимов работы элементов БВС и характеристик внешних воздействий.

Идея моделирования состоит в том, что система расходует ресурс в обмен на выполняемый объем вычислений и в результате внешних воздействий. Под ресурсами элемента (системы) понимаются: ресурс надежности, по накопленной дозе ИИ, ресурс по стойкости к ТЗЧ и ВЭП космического пространства, электроэнергетический ресурс, ресурс по стойкости к внезапным ДВ различной природы. Определяющей характеристикой БВС является эффективная производительность как потенциальная способность выполнить вычислительную работу, обладающую определенной ценностью в зависимости от состояния обеспечиваемой системы. Предложенный подход к оценке производительности БВС в заданной конфигурации дает возможность свернуть параметры задач и быстрогодействия, а обоснованные допущения позволяют формализовать возможные структуры БВС различных вариантов топологии широкого класса и алгоритмов управления ресурсами системы. Предложенный показатель эффективной производительности отражает влияние БВС на целевой эффект применения КА ДЗЗ в целом.

Основными преимуществами представленной модели выступают:

- снятие ограничений известных подходов по разнообразию элементов гетерогенной системы как с точки зрения структурной значимости, так и в смысле параметров, характеризующих деструктивные физические процессы в условиях возмущающих факторов;
- учет совместного влияния внешних факторов и режимов работы элементов на выработку ресурса при их априори неизвестной в силу самореконфигурирования системы динамике;
- оценка качества реализации множества функций БВС в частично работоспособных состояниях с позиций целевого эффекта целевой (обеспечиваемой) системы.

Предложенная модель выглядит достаточно открытой для агрегирования с моделями функциональных возможностей элементов, их надежности, стойкости и защищенности от внешних воздействий, моделями внешних воздействий различной природы, характеристиками задач и режимов функционирования КА, моделями диспетчеризации вычислительных процессов. Результаты ее использования применительно к оцениванию показателей надежности многомодульной перестраиваемой БВС КА подтверждает ее более высокую адекватность в сравнении с ранее использовавшимся подходом. На ее основе строятся методы [13], позволяющие подойти к решению вопросов синтеза структуры и управления перспективных реконфигурируемых БВС КА.

#### Список используемых источников

1. Захаров И. В. Живучесть информационно-вычислительных систем группировок космических аппаратов в условиях дестабилизирующих факторов и деструктивных воздействий // Военная мысль. 2017. № 6. С. 61-69.
2. Басыров А. Г., Захаров И. В. Оценивание живучести бортовых вычислительных систем космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. № 651. С.139-148.
3. Захаров И. В., Забузов В. С., Соколовский А. Н., Эсаулов К. А. Моделирование функционирования живучих бортовых вычислительных систем с учетом их структурно-параметрической деградации // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № S1. С. 60-66.
4. Козлов Д. И., Аншаков Г. П., Мостовой Я. А., Соллогуб А. В. Управление космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли. Компьютерные технологии. – М.: Машиностроение, 1998. – 367 с.
5. Захаров И. В. Модель перестраиваемой бортовой вычислительной системы в условиях возможной деградации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2017. № 658. С. 144-152.
6. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
7. Гончаренко В. А. Формальный аппарат представления случайных процессов обслуживания с возмущающими воздействиями и неопределенностью параметров // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2015. № 648. С. 13-18.

8. Смагин В. А. Вероятностные модели сложных систем. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2004. – 171 с.
9. Захаров И. В., Кремез Г. В. Построение бортовых вычислительных систем с учетом результатов испытаний элементной базы в условиях космического пространства // Научное обозрение. 2014. № 2. С. 176-179.
10. Надежность электрорадиоизделий: справочник. – М.: МО РФ – 2006. – 641 с.
11. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
12. Лысенко А. В., Захаров И. В., Кремез Г. В. Выбор структуры бортовой вычислительной системы с учетом результатов натурных экспериментов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2011. № 633. С. 87-91.
13. Захаров И. В. Рациональный выбор структур и конфигураций неоднородных вычислительных систем при помощи эволюционного поиска // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление». 2018. № 1. С. 85-90.

### Reference

1. Zakharov I. V. Survivability of spacecraft computer systems in terms of disturbing factors and destructive influences. *Military thought*, 2017, no. 6, pp. 61-69 (in Russian).
2. Basyrov A. G., Zakharov I. V. Ensuring survivability of on-board computer systems of spacecraft. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2016, vol. 651, pp. 139-148 (in Russian).
3. Zakharov I. V., Zabuzov V. S., Esaulov K. A., Sokolovskiy A. N. The modeling of survival onboard computing systems operating taking into account structural-parametric degradation. *High technology in space research of the Earth*, 2016, no. 8, pp. 60-66 (in Russian).
4. Kozlov D. I., Anshakov G. P., Mostovoy Y. A., Sollogub A. V. *Upravleniye kosmicheskimi apparatami distantsionnogo zondirovaniya Zemli. Kompyuternye tekhnologii* [Remote sensing spacecraft control. Computer technologies]. Moscow, Mashinostroenie, 1998. 367 p. (in Russian).
5. Zakharov I. V. Model of the functioning of reconfigurable on-board computer system in terms of degradation. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2017, vol. 658, pp. 144-152 (in Russian).
6. Aliyev T. I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Fundamentals of discrete systems modeling]. Saint-Petersburg, St. Petersburg State University for information technologies, mechanics and optics Publ., 2009. 363 p (in Russian).
7. Goncharenko V. A. The formal apparatus for representing random service processes with disturbing influences and parameter uncertainty. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2015, vol. 648, pp. 13-18 (in Russian).
8. Smagin V. A. *Veroyatnostnyye modeli slozhnykh sistem* [Probabilistic models of complex systems]. Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2004, 171 p. (in Russian).

9. Zakharov I. V., Kremez G. V. Creation onboard computing systems taking into account results of the element base tests in space conditions. *Scientific Review*, 2014, no. 2, pp. 176-179 (in Russian).

10. *Nadezhnost electroradioizdeliy: spravochnik* [Reliability of electroradio elements: handbook]. Moscow, Ministry of Defence of Russian Federation Publ., 2006, 641 p. (in Russian).

11. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2006, 704 p. (in Russian).

12. Lysenko A. V., Zakharov I. V., Kremez G. V. Choice the structure of on-board computer system taking into account natural experiments results. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2011, vol. 633, pp. 87-91 (in Russian).

13. Zakharov I. V. Rational choice of structures and configurations of heterogeneous computer systems through the evolutionary search. *Vestnik of Russian New University. "Complex systems: models, analysis, management" series*, 2018, no. 1, pp. 85-90 (in Russian).

Статья поступила 10 октября 2018 г.

### Информация об авторах

*Захаров Иван Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры математического и программного обеспечения. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: бортовые вычислительные системы космических аппаратов. E-mail: x.vano-z80@yandex.ru

*Забузов Вячеслав Сергеевич* – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем и сетей. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: мониторинг информационно-вычислительных сетей; информационная безопасность. E-mail: zzvss80@mail.ru

*Кузнецов Вадим Викторович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры математического и программного обеспечения. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: надежность информационно-вычислительных систем. E-mail: vadimkuznetsov@mail.ru

Адрес: 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

---

## Model of the reconfigurable on-board spacecraft computer system functioning under its structural-parametric degradation conditions

I. V. Zakharov, V. S. Zabuzov, V. V. Kuznetsov

**Introduction.** Building sufficiently adequate models of reconfigurable on-board computer systems (OCS) of advanced spacecraft requires a cumulative account of a number of factors. The main ones are the structural, functional and parametric heterogeneity of such systems, their multifunctionality, the influence of external unfavorable factors and variable load on the development of a resource by system elements, the

presence of a set of partially-operable states. It requires an improvement of the scientific and methodological apparatus. **Purpose.** The development of the OCS functioning model. It has a higher adequacy in comparison with the known models. The model is based on the account of destructive physical processes, under various operating modes of the elements of the reconfigurable system and the effects of the environment, as well as on the assessment of the target effect of its application in changing conditions. **Novelty.** This simulation-analytical model differs from the well-known representation of the functioning of a OCS by the dependence of the quality of its functions on the development of its resource in destructive physical processes taking into account the operating modes of the elements and the characteristics of external influences. **Results.** Building the model of functioning of the reconfigurable OCS under conditions of structural and parametric degradation includes the stages of estimating the target effect of the use of OCS, depending on its performance; evaluation of the performance of the OCS in the current configuration and structural parametric modeling of OCS degradation in the process of using. As the resources we consider a resource of reliability, a resource of the accumulated dose of ionizing radiation of outer space, an electric power resource, a resource of resistance to heavy charged particles and high-energy protons of outer space, a resource of resistance to sudden destructive influences of various nature. Indicators of effective performance and effective amount of computation show the influence of OCS on the target effect of using the Earth remote sensing satellite, in particular, its dynamic and integral performance. **Practical relevance.** The developed model is imitative-analytical and implemented in MatLab 7 environment. It is open enough for aggregation with models of the functionality of the elements, their reliability, radiation durability and protection from external influences, models of external influences, characteristics and tasks of the spacecraft functioning modes, scheduling models of computational processes. It is used in the development of methods for the synthesis of the structure and management of reconfigurable spacecraft systems.

**Key words:** on-board computer system, reconfigurable system, resource, degradation, space factors.

### Information about Authors

*Ivan Vyacheslavovich Zakharov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of Mathematic and Program providing. Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. Field of research: on-board computer systems of spacecraft. E-mail: x.vano-z80@yandex.ru

*Vyacheslav Sergeevich Zabuzov* – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior Lecturer at the Department of Info-computer systems and networks. Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. Field of research: monitoring of Info-computer networks; information security. E-mail: zzvvss80@mail.ru

*Vadim Victorovich Kuznetsov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of Mathematic and Program providing. Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. Field of research: reliability Info-computer systems. E-mail: vadimkuznetsov@mail.ru

Address: Russia, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya street, 13.