

ИМИТАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.В. Захаров, С.С. Зыкова (Санкт-Петербург)

Введение

Известные (логико-вероятностные, графовые, теоретико-игровые, статистические, матричные и др.) подходы к моделированию вычислительных систем позволяют отразить отдельные аспекты неопределенности их функционирования. Однако решение задач построения и управления бортовой вычислительной системы космических аппаратов (БВС КА) в рамках одного подхода приводит к недостаточно адекватным результатам, что вызывает потребность в новых подходах к математическому описанию процессов ее деградации в условиях воздействия возмущающих факторов (ВФ). Это обусловлено, прежде всего, следующими обстоятельствами. Структура БВС КА не является одноуровневой, а представима в виде иерархии функционально разнородных компонентов, поэтому не сводится к ассоциативному типу. Зависимость качества функционирования БВС КА от параметров функционирования ее элементов в общем случае не сводится к двоичной функции работоспособности. В случайные моменты времени может происходить изменение состояния БВС (структуры и характеристик системы в целом, характеристик и режимов работы элементов), которое в силу сложности алгоритма реконфигурации не сводится к простейшим схемам и правилам, а выработка ресурса элементами системы определяется совокупным влиянием разнообразных внешних факторов и переменной нагрузки. Многофункциональность БВС требует оценивать качество реализации ею множества функций в частично работоспособных состояниях. Отмеченные особенности вычислительных систем рассматриваемого класса как объекта моделирования ведут к тому, что получение аналитических решений представляется возможным лишь для относительно простых систем – с небольшим числом элементов, или же однородных, что определяет в конечном итоге имитационно-аналитический характер моделирования реконфигурируемой БВС КА с учетом ее структурно-параметрической деградации в условиях ВФ.

Формализация задачи построения модели реконфигурируемой БВС КА

Задача построения модели функционирования реконфигурируемой БВС КА формулируется следующим образом [1]. Будем считать, что заданы следующие исходные данные:

1. Структура S БВС КА. Состав структуры: множество вычислительных (ВМ) и интерфейсных (ИМ) модулей $\langle \zeta_j | j = 1 \dots N \rangle$ с характеристиками ресурса RES_j быстродействия $v_j(g_j)$, где g_j – режим функционирования элемента ζ_j ; $G = \langle g_j | j = 0, \dots, N \rangle$ – аппаратная конфигурация БВС КА. Связи в структуре БВС КА заданы в виде матрицы смежности: $\|s_{ij}\|_{N \times N}$.

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

3. Параметры ВФ $H = \langle D, \vec{h} \rangle$.

Множество $V = \{V_j | j = 1 \dots card V\}$ вариантов неблагоприятных воздействий (НВ) $V_j = \langle \vec{p}^{(j)}; \eta_E^{(j)}; \eta_T^{(j)} \rangle$, где $\vec{p} = \langle p_k | k = 1, \dots, N \rangle$ – вероятности выхода из строя элементов структуры БВС КА; $\eta_E^{(j)}; \eta_T^{(j)}$ – коэффициенты повреждения системы электроснабжения (СЭС) и системы терморегулирования (СТР) соответственно.

Множество $\mathbb{D} = \{D_i | i = 1 \dots \text{card}D\}$ сценариев НВ $D_i = \langle (V_k, \mu_{ik}(t)) | k = 1 \dots \text{card}D_i \rangle$ и весовые коэффициенты сценариев $\vec{\gamma} = \langle \gamma_i | i = 1 \dots \text{card}D \rangle$, где $\mu_{ik}(t)$ – закон распределения случайного времени реализации варианта V_j .

Параметры факторов космического пространства $\vec{h}(t) = \langle P_i^{p+}(t), P_i^{e-}(t), \varphi_i^{\text{ТЗЧ}}(t), \varphi_i^{\text{ВЭП}}(t), T_0(t) \rangle$, где P_i^{p+} – мощность дозы ионизирующих излучений (ИИ) по протонам, P_i^{e-} – мощность дозы ионизирующего излучения (ИИ) по электронам, $\varphi_i^{\text{ТЗЧ}}$ – мощность флюенса ТЗЧ, $\varphi_i^{\text{ВЭП}}$ – мощность флюенса ВЭП, T_0 – температура в отсеке БВС КА без учета деградации СТР.

4. Множество $\Omega = \{\omega_i | i = 1 \dots \text{card}\Omega\}$ вычислительных задач, решаемых БВС КА: $\omega_i = \langle \lambda_i, q_i^s, q_i^o, q_i^c, t_i^d, \beta_i \rangle$, λ_i – интенсивность потока задач i -го типа; q_i^s – объем задачи i -го типа при решении на специализированном ВМ, q_i^o – на неспециализированном ВМ, q_i^c – объем данных, передающихся по интерфейсам; t_i^d – директивное время решения; β_i – коэффициент критичности; коэффициент вариации V_Ω времени решения задачи на одном модуле и длительность t^u интервала решения вычислительных задач при выполнении целевой задачи.

5. Множество $\Xi = \{\xi_k | k = 1 \dots \text{card}\Xi\}$ функциональных режимов

$\xi_k = \langle \Omega_k, C_k, A_k \rangle$ БВС КА, определяющих: комплекс $\Omega_k \subseteq \Omega$ решаемых вычислительных задач; коэффициент C_k ценности режима; множество необходимых компонентов бортовой аппаратуры $A_k = \{a_i | i = 1 \dots \text{card}A_k\}$, $A_k \subseteq A$. Матрица специализации задач и вычислительных модулей:

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

6. Правило конфигурирования БВС КА $CF: \langle \Theta, A, H \rangle \rightarrow (G, \xi)$,

где $\Theta = \langle \theta_i | i = 1, \dots, N \rangle$ – состояние БВС, $\theta_i = \begin{cases} 0, & \zeta_i \text{ неработоспособен;} \\ 1, & \zeta_i \text{ исправен.} \end{cases}$

Требуется найти зависимость показателя результативности функционирования БВС КА от времени $J(t | MS)$ при заданных параметрах $MS = \langle S, \Omega, \Xi, A, H, CF \rangle$.

Построение модели функционирования реконфигурируемой БВС КА с учетом ее структурно-параметрической деградации

Задача построения модели функционирования реконфигурируемой БВС КА с учетом ее структурно-параметрической деградации решается в три этапа: моделирование структурно-параметрической деградации БВС КА в процессе функционирования, оценивание производительности БВС КА в текущей конфигурации и оценивание производимого целевого эффекта при применении БВС КА в зависимости от ее текущей производительности.

При этом будем различать два аспекта конфигурирования: аппаратную (параметрическую) конфигурацию, определяющую режимы работы элементов БВС, и функциональную конфигурацию (функциональный режим), задающую набор решаемых задач.

Структура модели схематично представлена на рис. 1.

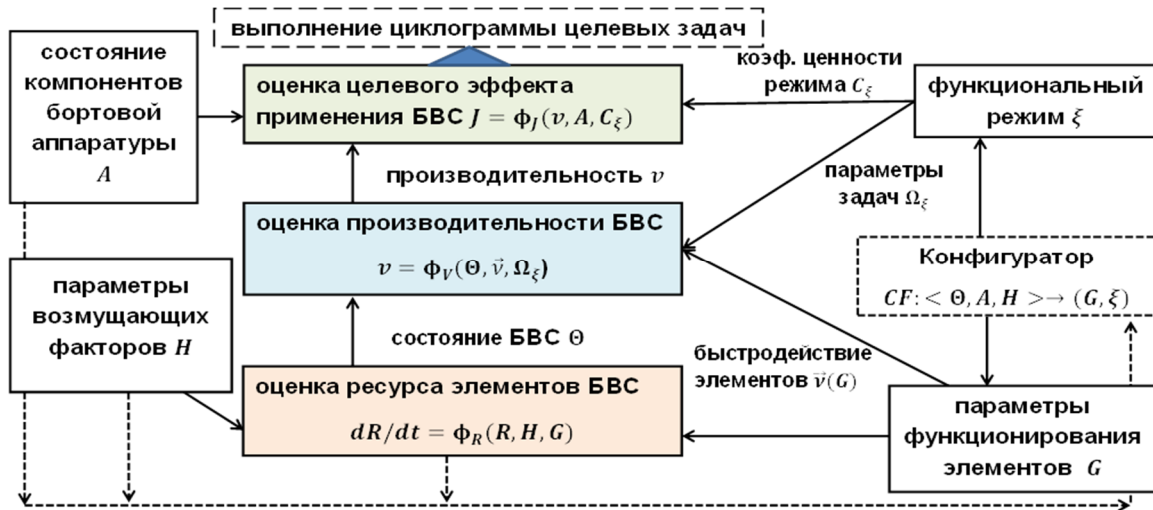


Рис. 1. Структура модели функционирования реконфигурируемой БВС КА с учетом ее структурно-параметрической деградации

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 объекта. Однако при изменяющихся условиях функционирования, в том числе при смене состояний системы по ее внутреннему алгоритму поведения, законы распределения случайных времен отказов практически не получить. Поэтому для построения модели работоспособности элементов реконфигурируемой БВС КА использован ресурсный подход, заключающийся в моделировании стохастического запаса ресурса элементов и его расхода в процессе функционирования системы в зависимости от параметров внутреннего состояния и среды.

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 Н.М. Седакиным. В то же время очевидно, что при работе БВС КА расходует и ресурсы иной природы, например, электроэнергию. Стохастические процессы НВ также можно описать в терминах расхода некоего ресурса. Обобщая 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, энергоресурс, количество перезаписей в ячейки *flash*-памяти и т.п.

Итак, пусть элементы БВС КА обладают расходуемыми ресурсами, типы которых обозначены как $R^{(1)} \dots R^{(r)}$. В момент времени t система характеризуется выработанным ресурсом $R(t) = \{\vec{r}_j(t) | j = 1, \dots, N\}$, где выработанный ресурс j -го элемента описывается в виде $\vec{r}_j(t) = \langle r_j^{(1)}(t), \dots, r_j^{(r)}(t) \rangle$, $\vec{r}_j(0) = \vec{0}$. Элементы БВС имеют запас ресурса $U = \{\hat{u}_j | j = 1, \dots, N\}$, $\hat{u}_j = \langle \hat{u}_j^{(1)}, \dots, \hat{u}_j^{(r)} \rangle$ – запас ресурсов j -го элемента. Расход ресурса в момент времени t задается функцией вида $\frac{d\vec{r}_i(t)}{dt} = \vec{\delta}_i[\vec{r}_i(t), g(t), H(t), \hat{x}]$, что соотносится с расширением Х.Л. Смолицким принципа Седакина. (В общем случае величина расхода ресурсов зависит от случайных факторов \hat{x} .) Текущее состояние элемента задается в виде функции Хевисайда от остаточного

ресурса: $\hat{\sigma}_i(t) = \prod_{j=1}^r \varsigma[\hat{u}_j^{(i)}(t) - r_j^{(i)}(t)]$, $\varsigma(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$. Исходя из анализа факторов, воздействующих на бортовую радиоэлектронную аппаратуру КА, имитационный аспект моделирования включает разыгрывание стохастических ресурсов элементов БВС КА следующим образом.

Ресурс надежности $R^{(\lambda)}$: $\hat{u}_i^{(\lambda)} = -\ln \hat{\varrho}$, здесь и ниже $\hat{\varrho} \in \mathbb{U}(0; 1)$ – равномерно распределенная случайная величина, а задание $\delta_i^{(\lambda)}(r_i^{(\lambda)})$ описано, например, в [1].

Ресурс по радиационным дозовым эффектам (эквивалентная накопленная доза ИИ космического пространства)

$$R^{(D)}: \hat{u}_i^{(D)} = (1 + V_D \cdot \sqrt{-2 \ln \hat{\varrho}_1} \cdot \cos 2\pi \hat{\varrho}_2) \cdot D_i^{\text{II}}, \quad (1)$$

где $D_i^{\text{II}} = \frac{D_i^{\text{CT}}}{1 - V_D \Phi_0^{-1}(p)}$ – поражающая доза ИИ, D_i^{CT} – уровень стойкости $\delta_i^{(D)}(t) = k_i^D(g_i) \cdot P^{\text{ИИ}}(t)$, $P^{\text{ИИ}}(t)$ – мощность поглощаемой дозы с учетом компоновки, Φ_0^{-1} – функция, обратная функции Лапласа, $k_i^D(g_i)$ – коэффициент опасности воздействия ИИ в зависимости от электрической нагрузки.

Ресурс по воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) космического пространства $R^{(\varphi)}$: $\hat{u}_i^{(\varphi)} = -\ln \hat{\varrho}$;

$$\delta_i^{(\varphi)} = k_i^{(\varphi)}(g) \cdot \lambda_i^{(\varphi)}(\varphi), \quad (2)$$

где $\lambda_i^{(\varphi)}(\varphi)$ – интенсивность отказов вследствие воздействия ТЗЧ и ВЭП, $k_i^{(\varphi)}(g)$ – коэффициент ее изменения в зависимости от электрической нагрузки, φ – совокупность параметров спектра ТЗЧ и ВЭП.

Ресурс по внезапным НВ $R^{(\chi)}$: $u_j^{(\chi)}$ – вероятность выхода элемента из строя в случае НВ V_χ ; наличие события НВ V_χ на интервале $[t; t + \tau]$ разыгрывается как выполнение условия $\mu_\chi \tau > \hat{\varrho}$: в этом случае $\hat{\delta}_j^{(\chi)} = \frac{\varsigma(u_i^{(\chi)} - \hat{\varrho} \cdot \chi_j(g_j))}{\tau}$, где $\chi_j(g_j)$ – коэффициент опасности НВ в зависимости от режима нагрузки; если $\mu_\chi \tau \leq \hat{\varrho}$, то $\hat{\delta}_i^{(\chi)} = 0$.

Энергоресурс БВС КА $R^{(E)}$ не является стохастическим. Однако разыгрывается стохастический процесс деградации системы электроснабжения при НВ следующим образом: $r^{(s)} = 1 - k^A$, где k^A – коэффициент деградации системы электроснабжения; $u^{(s)} = 1$; $\hat{\delta}^{(s)} = (1 - \hat{\eta})(1 - r^{(s)})$, если имело место НВ V_χ за интервал $[t; t + \tau]$ и $\hat{\delta}_i^{(s)} = 0$ в противном случае; $\hat{\eta} = \hat{\varrho}^{\frac{1-\eta}{\eta}}$ – случайный коэффициент повреждения в результате НВ V_χ , имеющий математическое ожидание η (параметр повреждения) и плотность распределения $f_\eta(x) = \frac{\eta}{1-\eta} x^{\frac{2\eta-1}{1-\eta}}$, $x \in (0; 1]$.

Удобство предложенного распределения для имитационно-аналитических моделей состоит в том, что оно, являясь однопараметрическим, при $\eta = 0$ и $\eta = 1$ сводит коэффициент деградации к детерминированному, а при $\eta = 1/2$ – к равномерному распределению. При этом отражен случайный характер повреждения некоторого количества элементов соответствующей системы из их совокупности.

Для полноты описания модели укажем, что при оценивании производительности гетерогенной иерархически-сетевой БВС КА в стационарной конфигурации с учетом разнородности задач по ресурсоемкости и критичности она представляется как сеть массового обслуживания с узлами типа $M/G/1$, что позволяет для решения этой частной подзадачи применить аналитические методы с низкой вычислительной сложностью (решается на каждом шаге модельного времени).

Оценивание целевого эффекта, достигаемого применением БВС КА, производится через оценивание показателей результативности выполнения циклограммы целевых задач КА через вероятности решения в БВС КА набора вычислительных задач, определяемые показателями производительности БВС КА.

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.

Общая схема имитационно-аналитического моделирования кратко представлена на рис. 2.

Алгоритм имитационного моделирования может быть записан на универсальном процедурно-ориентированном языке программирования.

Разработанная модель реализована [2] в среде пакета MatLab 7. Это связано со следующими преимуществами:

- отсутствие ограничений на состав и логику модели;
- возможность оперативной корректировки логики работы моделируемой системы;
- возможность управления ходом экспериментов;
- возможность работы на любой ЭВМ;
- понятность логики модели как программистам, так и исследователям.

Недостатки же во многом компенсируются при совмещении ролей разработчика модели, исследователя и программиста. В качестве существенного преимущества приходится также отметить наличие разрешения на работу в организации с MatLab 7, и наличие лицензированной версии пакета.

Оценка адекватности модели включала проверку полноты учёта основных факторов и ограничений; осмысленности результатов при нормальных условиях; соответствия исходных данных модели реальным; корректности моделирующей программы и правильности получения конечных результатов из исходных данных. Ее исследование продемонстрировало непротиворечивость результатов моделирования и теоретических соображений по анализу многомодульных вычислительных систем. В частности, на примере эксплуатационных оценок коэффициента готовности и расчетно-аналитических оценок надежности БВС КА дистанционного зондирования Земли (традиционной двухмашинной трехканальной структуры на базе межпроцессорной троированной шины и перспективной четырехканальной структуры на базе средств межпроцессорной коммутации) показано, что полученные оценки не противоречат известным.

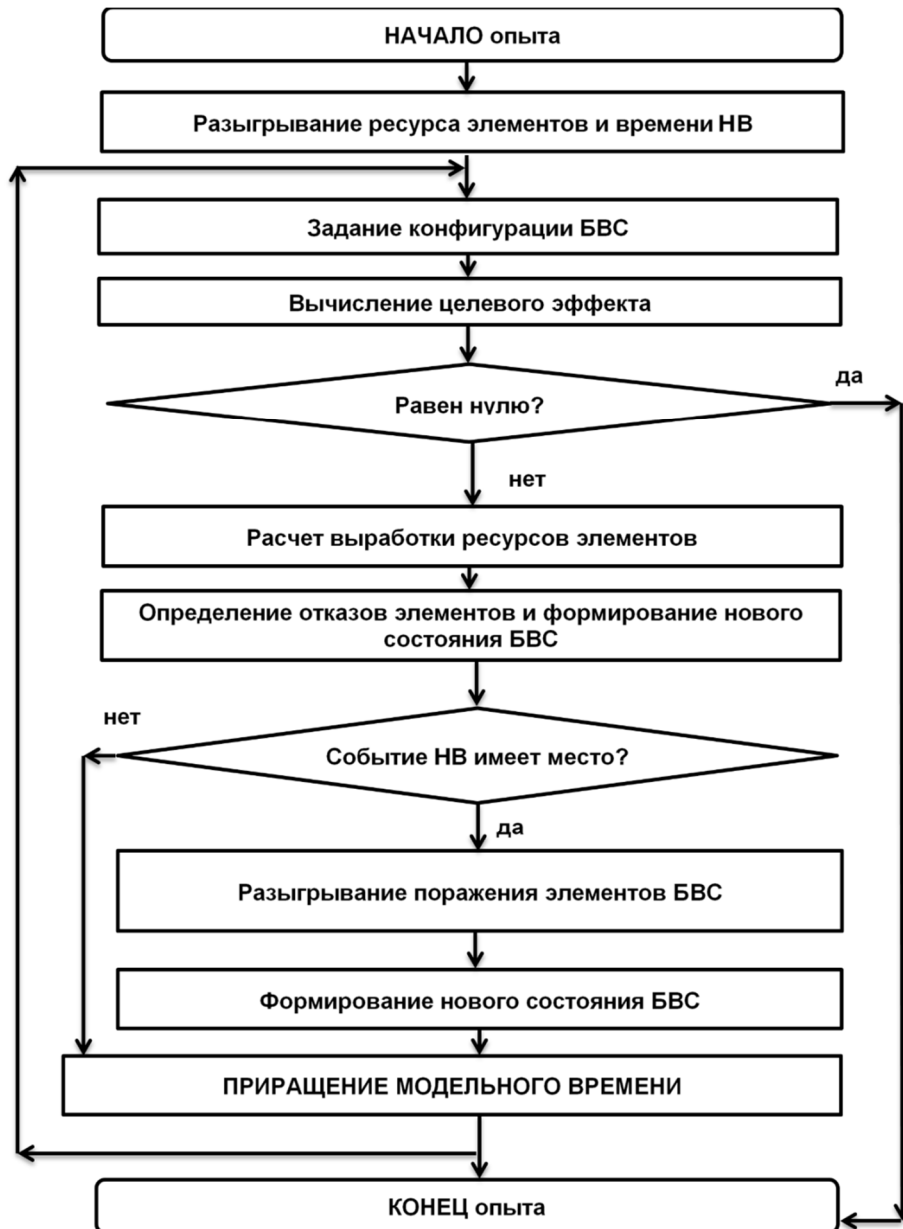


Рис. 2. Схема имитационно-аналитического моделирования функционирования БВС КА

Далее проводилось моделирование функционирования многомодульной БВС малого КА в сравнении с подходом к оцениванию целевого эффекта функционирования реконфигурируемой БВС по показателю математического ожидания суммарного быстрогодействия, и определению показателей надежности по вероятности суммарного быстрогодействия БВС не ниже требуемого.

При этом среднеквадратическое отклонение оценок вероятностных показателей надежности при моделировании (для 250 тыс. опытов) было не хуже 0,002. 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.

Результаты использования предложенной модели применительно к оцениванию показателей надежности многомодульной перестраиваемой БВС КА подтверждают ее более высокую адекватность в сравнении с ранее использовавшимся подходом. Следует, однако, отметить существенную трудоемкость реализации предложенного подхода. Так, время вычисления однократной реализации ЦФ составило в среднем 274 мс для 100 шагов интегрирования (ПЭВМ на базе Intel i5 с тактовой частотой 3 ГГц в среде MatLab 7.13.0.291), а среднеквадратическому отклонению оценки выбранной целевой функции 1% соответствовало около 10^4 опытов.

Заключение

Имитационно-аналитическая модель реконфигурируемой БВС КА, в отличие от известных, позволяет наблюдать и исследовать зависимость результативности функционирования БВС КА от вариантов ее конфигурирования в условиях ВФ за счет:

- снятия ограничений известных подходов по разнообразию элементов гетерогенной БВС как с точки зрения структурной значимости, так и в смысле параметров, характеризующих деструктивные физические процессы;
- учета совместного влияния внешних факторов и режимов работы элементов на выработку ресурса при их априорной неопределенности;
- учета частично работоспособных состояний многофункциональной вычислительной системы с позиций целевого эффекта целевой (обеспечиваемой) системы.

На ее основе строятся методы [3], позволяющие подойти к решению вопросов синтеза структуры и управления перспективных реконфигурируемых БВС КА. В частности, метод выбора структуры неоднородной иерархической информационно-вычислительной системы на основе генетического алгоритма [4] позволяет, в том числе, существенно снизить вычислительную трудоемкость поиска, обусловленную имитационным характером используемой модели. Это свидетельствует о том, что технологии имитационного моделирования по-прежнему остаются востребованными при решении проблем анализа и синтеза сложных систем, в особенности характеризующихся динамикой функционирования, самоуправляемой структурой, стохастичностью воздействующих факторов.

Литература

1. Модель функционирования реконфигурируемой бортовой вычислительной системы космического аппарата в условиях ее структурно-параметрической деградации / В.С. Забузов, И.В. Захаров, В.В. Кузнецов // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 176-195. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/09-Zakharov.pdf>.
2. Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ 2018617777. Программный комплекс моделирования реконфигурируемых информационно-вычислительных систем / Басыров А.Г., Захаров И.В., Эсаулов К.А. – № 2018614958; заявл. 14.05.2018; опубл. 02.07.2018, Бюл. № 7.
3. Метод превентивного функционально-параметрического конфигурирования бортовой вычислительной системы космического аппарата на основе прогнозирования ее деградации / А.Г. Басыров, В.С. Забузов, И.В. Захаров // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 665. С. 183-193.
4. Метод выбора структуры неоднородной иерархической информационно-вычислительной системы на основе генетического алгоритма / А.Г. Басыров, И.В. Захаров, А.О. Шушаков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 665. С. 14-24.