

МЕТОД ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВОГО СБАЛАНСИРОВАННОГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

THE METHOD OF CHOOSING THE PARAMETERS OF THE STABLE BALANCED DEVELOPMENT OF THE SPACE INFORMATION SUPPORT SYSTEM

***Аннотация.** Рассмотрен метод выбора параметров устойчивого сбалансированного развития системы космического информационного обеспечения (КИО). Метод предназначен для решения задач планирования и управления развитием системы КИО в условиях неопределённости, ресурсных (финансовых) и временных ограничений. Метод основан на комбинированном использовании математических моделей процессов функционирования и развития системы КИО, а также модифицированного алгоритма конкурирующих точек, включающего процедуру направленного случайного поиска с обучением.*

***Annotation.** The method of choosing the parameters of the stable balanced development of the Space Information Support system (SIS) is considered. The method is designed for solving the problems of planning and controlling SIS system development under the conditions of uncertainty, resources (finance) and time restrictions. The method is based on the combined use of mathematical models of SIS system functioning and evolving processes and the modified algorithm of competitive points which includes the directed random search procedure with training.*

***Ключевые слова.** Система космического информационного обеспечения, параметры развития, программа развития.*

***Key words.** Space information support system, development parameters, development program.*

1. Методические положения, используемые при разработке метода

Предлагаемый метод разработан на основе методического подхода, изложенного в работах [1,2], и предназначен для решения задачи выбора параметров устойчивого сбалансированного развития системы космического информационного обеспечения (КИО), которая формулируется следующим образом.

При известных характеристиках $\bar{x}(t)$ и требуемых значениях показателей $\bar{W}^{*n}(t)$ эффективности функционирования системы КИО определить значения параметров $\bar{y}_{opt}(t)$ управления, таких что

$$\bar{y}_{opt}(t) = \arg \min_{\bar{y}_{opt}(t) \in Y} \left\{ \max_{\Delta t_k \in T} r_{\Sigma}(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), \bar{W}^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_k) \right\},$$

$$k = \overline{1, K} \tag{1}$$

при ограничениях

$$\bar{R}_{\beta}(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), \bar{W}^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_i) \leq \bar{R}_{don}(\Delta t_i);$$

$$\Delta t_i \in T, i = \overline{1, I};$$

$$\bar{P}(\tau(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), \bar{W}^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t)) \leq \Delta t_i) \geq \beta,$$

где $\bar{x}(t)$ – вектор характеристик (неуправляемых параметров) системы КИО;

$\bar{Z}(t)$ – вектор условий развития;

$\bar{W}^{*n}(t)$ – вектор требуемых значений показателей эффективности функционирования системы КИО (относительных выходных эффектов);

$\bar{R}_{\beta}(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), \bar{W}^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_i)$ – вектор верхних интервальных оценок уровней затрат ресурсов на i -м интервале времени периода развития системы КИО при доверительной вероятности β ;

T – программный период развития системы КИО;

$\bar{P}(\tau(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), \bar{W}^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t)) \leq \Delta t_i)$ – вектор вероятностей выполнения запланированных мероприятий на i -м интервале времени периода развития системы КИО;

$r_{\Sigma}(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), \bar{W}^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_k)$ – совокупный (суммарный) риск дисбалансов системы КИО на k -м интервале времени периода развития системы КИО, определяемый с использованием выражения

Поповкин Владимир Александрович – кандидат технических наук, заместитель министра обороны РФ по вооружению, контактный телефон – 519-91-89.

Povovkin Vladimir Alexandrovich – candidate of technical sciences, Deputy Minister of the Russian Federation for Armament, telephone number for contacts-519-91-89.

$$r_{\Sigma} = \sum_{j=1}^J k_j(\Delta t_k) \cdot p_j(q_j(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), W_j^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_k) > 0) \times m_{q_j}(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), W_j^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_k),$$

где $k_j(\Delta t_k) \in (0, 1)$ – коэффициент важности j -й задачи на k -м интервале времени периода развития системы КИО;

$p_j(q_j(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), W_j^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_k) > 0)$ – вероятность возникновения дисбаланса по j -й задаче на k -м интервале времени периода развития системы КИО;

$m_{q_j}(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), W_j^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_k)$ – математическое ожидание величины дисбаланса по j -й задаче на k -м интервале времени периода развития системы КИО.

Случайные величины, соответствующие значениям дисбалансов (несоответствия характеристик $W_j^n(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_k)$ системы требуемым уровням $W_j^{*n}(\Delta t_k)$) на интервалах времени $t_k \in T$, определяются с использованием соотношения [1]

$$q_j(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), W_j^{*n}(t), \bar{y}_{opt}(t), t_k) = (-1)^v \cdot \frac{W_j^{*n}(\Delta t_k) - W_j^n(\bar{x}(t), \bar{Z}(t), \bar{y}_{opt}(t), \Delta t_k)}{W_j^{*n}(\Delta t_k)},$$

где j – индекс решаемой целевой задачи, $j = \overline{1, J}$;

v – целое число, принимающее значение $v = 0$ в случае, когда увеличение значений y ведёт к повышению эффективности системы и $v = 1$, когда увеличение значений y приводит к снижению эффективности системы.

К параметрам управления развитием системы КИО относятся [1]:

- структурные параметры $\bar{y}_j(t)$ общей программы развития системы КИО, включающей частные программы создания и эксплуатации космических систем (КС), комплексов (КК) и их элементов. Значения структурных параметров соответствуют номерам (индексам) используемых вариантов реализации частных программ в составе общей программы развития системы КИО;

- временные параметры $\bar{y}_2(t)$, соответствующие продолжительности этапов (стадий) реализации различных частных программ развития системы КИО, включая программы научно-исследовательских (НИР), опытно-конструкторских работ (ОКР), серийного производства, заказов (поставок) изделий, развертывания, эксплуатации, снятия с вооружения и утилизации космических систем (комплексов) и их элементов;

- параметры $\bar{y}_3(t)$ частных программ создания и эксплуатации КС (КК), их элементов. В качестве параметров частных программ предлагается использовать количественные характеристики создаваемых или эксплуатируемых КС (КК), например, количество: космических аппаратов (КА) в составе орбитальной системы, рабочих мест подготовки КА, комплектов наземной аппаратуры и др.

Выбор рациональных значений параметров $\bar{y}_1(t), \bar{y}_2(t), \bar{y}_3(t)$ представляет собой решение задачи синтеза (структурно-параметрической оптимизации) программы развития системы КИО в целом, которая в качестве отдельных компонентов включает различные частные программы, в том числе программы выполнения НИР, ОКР, производства, заказов, поставок, испытаний, эксплуатации и утилизации космических систем (комплексов) и их элементов.

Каждый возможный вариант реализации программы развития системы КИО представляет собой совокупность реализуемых (старых) и перспективных (новых) частных программ развития, связанных между собой фазовыми переходами [1] определенного вида, и может быть описан некоторым ориентированным графом (стохастической сетевой моделью) $G_s = (\bar{y}_1^{opt}(t))_s$, где s – индекс реализуемого варианта структуры графа.

Задача структурно-параметрической оптимизации программы развития системы КИО может быть декомпозирована на две подзадачи:

1) формирования множества $\{G_s\}, s = \overline{1, S}$ реализуемых вариантов структуры графов;

2) определение рациональных значений управляемых параметров $\bar{y}_{1s}(t), \bar{y}_{2s}(t), \bar{y}_{3s}(t)$, соответствующих минимальному значению суммарного риска дисбалансов на интервалах времени развития системы КИО при заданных ограничениях (1).

Учитывая то, что количество возможных структур графа $\{G_s\}$ и значений параметров $\bar{y}_{2s}(t), \bar{y}_{3s}(t)$ может быть весьма большим, прямой перебор и сравнение всех возможных вариантов по выбранному критерию оптимальности и ограничениям вряд ли реализуемы. Для решения поставленной задачи (1) предлагается разработать новый метод, основанный на построении модифицированного алгоритма конкурирующих точек [4], использующего байесовскую процедуру направленного глобального случайного поиска с обучением [5]. Разработка указанного метода является предметом данной статьи.

2. Состав исходных данных, моделей и алгоритмов

В состав исходных данных, необходимых для решения задачи выбора параметров устойчивого сбалансированного развития системы космического информационного обеспечения, входят:

- множество $\mathfrak{R}^{cp} = \{j_{m_1}\}, m_1 = \overline{1, M_1}$ целевых задач, которые решаются или в будущем могут решаться системой КИО в интересах различных потребителей;

- множество $\mathfrak{R}^{cp} = \{j_{m_2}\}, m_2 = \overline{1, M_2}$ задач, решаемых системой КИО в целях собственного развития

(научно-производственной базы, системы эксплуатации);

- множество $K = \{k_{m_1}\}, m_1 = \overline{1, M_1}$ коэффициентов важности решаемых задач;
- множество $W = \{W_{m_1}\}, m_1 = \overline{1, M_1}$ выходных эффектов КС (КК) по решению целевых задач;
- множество $Z = \{z_\chi\}, \chi = \overline{1, X}$ параметров условий развития системы, где χ - индекс параметра;
- множество $\Theta^p = \{g_{m_1}^p\}, m_1 = \overline{1, M_1}$ осуществляемых частных программ развития системы КИО и множества $\mathcal{G}_{m_1}^p = \{g_{m_1, v}^p\}, v = \overline{1, V_{m_1}}$ возможных вариантов их продолжения и завершения;
- множество $\Theta^n = \{g_{m_2}^n\}, m_2 = \overline{1, M_2}$ перспективных программ развития системы КИО и множества $\mathcal{G}_{m_2}^n = \{g_{m_2, v}^n\}, v = \overline{1, V_{m_2}}$ возможных вариантов их реализации;
- множества $\mathfrak{R}_{m_1}^{uz} = \{j_{m_1, v, j}\}, j = \overline{1, J_{m_1, v}}$ целевых задач и $\mathfrak{R}_{m_2, v}^{uz} = \{j_{m_2, v, j}\}, j = \overline{1, J_{m_2, v}}$ задач развития системы КИО, которые решаются при выборе определенных вариантов осуществления частных программ развития;
- множества $G_{m_1}^p = \{g_{m_1, v}^p\}, v = \overline{1, V_{m_1}}$ и $G_{m_2}^n = \{g_{m_2, v}^n\}, v = \overline{1, V_{m_2}}$ ориентированных графов (сетевых графиков поэтапного выполнения работ) для предлагаемых вариантов осуществления выполняемых и перспективных частных программ развития системы КИО соответственно;
- множества $T_{m_1, v}^n = \{t_{m_1, v, \mu, \pi}^n\}, \mu = \overline{1, \Pi_{m_1, v}}$ и $T_{m_1, v}^p = \{t_{m_1, v, \mu, \pi}^p\}, \mu = \overline{1, \Pi_{m_1, v}}$ вариантов решений по срокам начала и продолжительности реализации этапов предлагаемых вариантов осуществления выполняемых и перспективных программ развития системы КИО, где μ - индекс этапа, π - индекс варианта решений;
- множества $N_{m_1, v}^p = \{n_{m_1, v, \zeta}^p\}, \zeta = \overline{1, \Lambda_{m_1, v}}$ и $N_{m_2, v}^n = \{n_{m_2, v, \zeta}^n\}, \zeta = \overline{1, \Lambda_{m_2, v}}$ вариантов решений по штатному количеству объектов в составе эксплуатируемых и перспективных КС (КК), где ζ - индекс типа объекта, λ - индекс варианта решений;
- функции распределения $\Phi_{ym_1, v}^p, \Phi_{ym_2, v}^n$ значений (оценок) тактико-технических и эксплуатационно-технических характеристик элементов существующих и перспективных КС (КК) соответственно, обеспечиваемых при реализации различных вариантов программ;
- функции распределения $F_{R_1, m_1, v}^p$ и $F_{R_1, m_2, v}^n$ значений (оценок) затрат ресурсов различного вида, необходимых для выполнения работ в ходе осуществления программ развития системы КИО (НИР, ОКР, производства, эксплуатации, утилизации элементов).

Кроме перечисленных выше исходных данных, для решения поставленной задачи выбора параметров устойчивого сбалансированного развития системы КИО необходимы следующие модели, методики и алгоритмы.

1. Модели процессов функционирования и разви-

тия системы КИО, включая:

- стохастические сетевые модели процессов разработки, производства и эксплуатации КС (КК) и их элементов, соответствующие реализации определенных частных программ развития системы КИО, и алгоритмы оценки их временных и стоимостных показателей;
 - имитационные модели функционирования КС (КК) и их элементов.
2. Алгоритмы (методики) оценки выходных эффектов КС (КК), дисбалансов развития системы КИО и рисков их возникновения.
 3. Алгоритм формирования возможных вариантов структур программы развития системы КИО.
 4. Алгоритм выбора параметров устойчивого сбалансированного развития системы космического информационного обеспечения ВС РФ (модифицированный алгоритм конкурирующих точек, использующий байесовскую процедуру направленного глобального случайного поиска с обучением).

3. Алгоритм формирования возможных вариантов структур программы развития системы КИО

Под структурой программы КИО понимается упорядоченное во времени множество реализуемых частных программ развития системы и связи между ними. Данная структура может быть описана ориентированным графом (сетью), вершинам которого соответствуют определенные состояния системы, а ребрам - реализуемые частные программы ее развития.

Для формирования возможных вариантов структур программы развития системы КИО можно взять за основу алгоритм, представленный в работе [3] и позволяющий генерировать уникальные (не повторяющиеся) структуры, отвечающие требованиям:

- а) полноты охвата решаемых целевых задач и задач развития системы КИО в течение всего периода T ее развития;
- б) неизбыточности реализуемых частных программ по решаемым задачам;
- в) наличия условий и ресурсов, необходимых для реализации всех частных программ, входящих в состав общей программы развития системы КИО;
- г) обеспечения непрерывности задействования сил, участвующих в создании и эксплуатации системы КИО, загрузки соответствующих рабочих мест и полного использования располагаемых ресурсов.

Использование данного алгоритма позволяет существенно сократить количество анализируемых вариантов программы развития системы КИО на основе ис-

ключения (отбраковки) вариантов, не удовлетворяющих сформулированным выше требованиям.

Для удобства рассмотрения представим частные программы развития системы КИО и решаемые в ходе их реализации задачи в табличной форме (табл. 1).

Таблица 1

Программы развития системы КИО и решаемые в ходе их реализации задачи

Программы	Задачи					
	j_1	j_2	...	j_n	...	j_N
\mathcal{G}_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}	...	a_{1N}
\mathcal{G}_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}	...	a_{2N}
...
\mathcal{G}_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}	...	a_{mN}
...
\mathcal{G}_M	a_{M1}	a_{M2}	...	a_{Mn}	...	a_{MN}

Примечание: j_n – n -я решаемая задача; \mathcal{G}_m – m -я программа развития системы КИО; a_{mn} – переменная, принимающая значение 1, если в ходе реализации m -й программы решается n -я задача, и 0, если данная задача не решается.

Из таблицы следует, что каждая задача развития системы КИО может решаться в ходе реализации различных частных программ. Поэтому с помощью логических операций можно записать, что решение n -й задачи есть дизъюнкция $\bigvee_{\mathcal{G}_m \in \Theta_n} \mathcal{G}_m$ решающих ее частных программ, где $\Theta_n \in \Theta$ множество реализуемых программ, для которых $a_{sj} = 1$. Условие решения всех актуальных задач развития системы КИО есть конъюнкция этих задач

$$j_1 \wedge j_2 \wedge \dots \wedge j_s \wedge \dots \wedge j_n.$$

Подставляя в данное выражение условие решения s -й задачи, получаем

$$\left(\bigvee_{\mathcal{G}_m \in \Theta_1} \mathcal{G}_m \right) \wedge \left(\bigvee_{\mathcal{G}_m \in \Theta_2} \mathcal{G}_m \right) \wedge \dots \wedge \left(\bigvee_{\mathcal{G}_m \in \Theta_n} \mathcal{G}_m \right) \dots$$

$$\dots \wedge \left(\bigvee_{\mathcal{G}_m \in \Theta_N} \mathcal{G}_m \right) = \prod_{n=1}^N \left(\sum_{\mathcal{G}_m \in \Theta_n} \mathcal{G}_m \right).$$

Для получения избыточных групп частных программ развития системы КИО необходимо раскрыть скобки данного выражения по законам алгебры логики. В результате получим все возможные избыточные группы частных программ, перекрывающие все его дизъюнкции.

Непосредственное раскрытие скобок полученного выражения для решения данной задачи в общем виде не представляется возможным из-за чрезмерного объема работ. Однако на практике приведенное выше выражение для определения избыточных групп значительно упрощается, так как для решения задач развития системы КИО предлагается конечное число программ и каж-

дая программа решает одну или несколько задач из относительного большого общего количества решаемых задач. Для наглядности рассмотрим пример (табл.2).

Таблица 2

Реализуемые программы развития и решаемые задачи

Программы	Задачи				
	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5
\mathcal{G}_1	1	0	1	0	0
\mathcal{G}_2	0	1	0	0	1
\mathcal{G}_3	0	0	0	1	0
\mathcal{G}_4	1	0	0	0	1
\mathcal{G}_5	0	0	1	0	0
\mathcal{G}_6	0	1	0	0	0

Из таблицы следует, что задача изделия j_1 решается при реализации программ \mathcal{G}_1 и \mathcal{G}_4 , задача j_2 – при реализации программ \mathcal{G}_2 и \mathcal{G}_6 , задача j_3 – при реализации программ \mathcal{G}_1 и \mathcal{G}_5 , задача j_4 – при реализации программы \mathcal{G}_3 , задача j_5 – при реализации программ \mathcal{G}_2 и \mathcal{G}_4 .

Таким образом, с помощью логических операций можно записать условия решения задач

$$j_1: \mathcal{G}_1 \vee \mathcal{G}_4;$$

$$j_2: \mathcal{G}_2 \vee \mathcal{G}_6;$$

$$j_3: \mathcal{G}_1 \vee \mathcal{G}_5;$$

$$j_4: \mathcal{G}_3;$$

$$j_5: \mathcal{G}_2 \vee \mathcal{G}_4.$$

Условие решения всех задач

$$j_1 \wedge j_2 \wedge j_3 \wedge j_4 \wedge j_5.$$

Подставляя в данное выражение условие решения каждой задачи, получаем

$$(\mathcal{G}_1 \vee \mathcal{G}_4) \wedge (\mathcal{G}_2 \vee \mathcal{G}_6) \wedge (\mathcal{G}_1 \vee \mathcal{G}_5) \wedge \mathcal{G}_3 \wedge (\mathcal{G}_2 \vee \mathcal{G}_4).$$

Раскроем скобки данного выражения по законам алгебры логики и получим все возможные избыточные группы программ, перекрывающие все его дизъюнкции:

$$\begin{aligned} & (\mathcal{G}_1 \vee \mathcal{G}_4) \wedge (\mathcal{G}_2 \vee \mathcal{G}_6) \wedge (\mathcal{G}_1 \vee \mathcal{G}_5) \wedge \mathcal{G}_3 \wedge (\mathcal{G}_2 \vee \mathcal{G}_4) = \\ & = (\mathcal{G}_1 + \mathcal{G}_4) \cdot (\mathcal{G}_2 + \mathcal{G}_6) \cdot (\mathcal{G}_1 + \mathcal{G}_5) \cdot \mathcal{G}_3 \cdot (\mathcal{G}_2 + \mathcal{G}_4) = \\ & = \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3}_{1} + \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4}_{2} + \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_5}_{3} + \\ & + \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4 \cdot \mathcal{G}_5}_{4} + \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_6}_{5} + \\ & + \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4 \cdot \mathcal{G}_6}_{6} + \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_5 \cdot \mathcal{G}_6}_{7} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4 \cdot \mathcal{G}_5 \cdot \mathcal{G}_6}_{8} + \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4 \cdot \mathcal{G}_6}_{9} + \\
 &+ \underbrace{\mathcal{G}_1 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4 \cdot \mathcal{G}_5 \cdot \mathcal{G}_6}_{10} + \underbrace{\mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4 \cdot \mathcal{G}_5}_{11} + \\
 &+ \underbrace{\mathcal{G}_2 \cdot \mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4 \cdot \mathcal{G}_5 \cdot \mathcal{G}_6}_{12} + \underbrace{\mathcal{G}_3 \cdot \mathcal{G}_4 \cdot \mathcal{G}_5 \cdot \mathcal{G}_6}_{13}.
 \end{aligned}$$

После раскрытия скобок и упрощения данного выражения получилось 13 избыточных групп программ, каждая из которых представляет собой множество частных программ, в ходе реализации которых обеспечивается решение всех пяти задач. Таким образом, количество рассматриваемых вариантов структуры программы развития с помощью данного алгоритма сократилось до 13.

Очевидно, что по мере развития системы КИО состав решаемых задач и реализуемых программ развития изменяется. С целью учета данной динамики, а также условий, необходимых для реализации различных частных программ, осуществления возможных фазовых переходов от старых программ к новым, обеспечения непрерывности загрузки рабочих мест и полного использования имеющихся ресурсов, введем некоторые уточнения в описанный выше алгоритм формирования возможных вариантов структур программы развития системы КИО.

Для этого введем в имеющиеся соотношения в качестве аргумента параметр времени t .

Кроме того, запишем логические функции реализации для частных программ развития

$$\begin{aligned}
 \mathcal{G}_m(t) &= \left(\bigwedge_{x_{R_i}^m \in X_R^m} x_{R_i}^m(t) \right) \wedge \left(\bigwedge_{x_{Z_k}^m \in X_Z^m} x_{Z_k}^m(t) \right) = \\
 &= \prod_{x_{R_i}^m \in X_R^m} x_{R_i}^m(t) \prod_{x_{Z_k}^m \in X_Z^m} x_{Z_k}^m(t),
 \end{aligned}$$

где X_R^m и X_Z^m – множества ресурсов и условий, необходимых для осуществления m -й программы развития системы КИО.

При разбиении всего периода T на множество равных промежутков времени Δt получим следующую конъюнкцию для возможных вариантов структур программы развития системы КИО в целом

$$\begin{aligned}
 &\bigwedge_{\Delta t_i \in T} \left(\bigwedge_{j_n \in J} \left(\bigvee_{\mathcal{G}_m \in \Theta_n} \left(\bigwedge_{x_{R_i}^m \in X_R^m} x_{R_i}^m(\Delta t_i) \right) \wedge \left(\bigwedge_{x_{Z_k}^m \in X_Z^m} x_{Z_k}^m(\Delta t_i) \right) \right) \right) = \\
 &= \prod_{\Delta t_i \in T} \left(\prod_{j_n \in J} \left(\sum_{\mathcal{G}_m \in \Theta_n} \left(\prod_{x_{R_i}^m \in X_R^m} x_{R_i}^m(\Delta t_i) \prod_{x_{Z_k}^m \in X_Z^m} x_{Z_k}^m(\Delta t_i) \right) \right) \right).
 \end{aligned}$$

При реализации программ развития системы КИО создаются условия и ресурсы, необходимые для реализации новых программ. Однако переход к реализации

выбранной программы исключает возможность осуществления имеющихся альтернативных вариантов на последующих промежутках времени (т.е. не создаются условия для их реализации). Указанное обстоятельство учитывается вводом в состав множества X_Z^m условий элемента (индикатора), принимающего значение 1 при осуществлении реализуемых альтернативных (дублирующих) программ развития и 0 – при их реализации на рассматриваемом промежутке времени $\Delta t_i \in T$.

Для проверки непрерывности загрузки рабочих мест и полного использования располагаемых (созданных) ресурсов вводится специальная индикаторная функция, принимающая значение 1, если данные условия обеспечиваются по всем видам ресурсов (рабочих мест), и 0, если хотя бы в одном из случаев они не обеспечиваются.

Предлагается вычислительная процедура, позволяющая формировать возможные варианты структур программы развития системы КИО с использованием метода Монте-Карло.

Решение данной задачи начинается с разбиения планируемого периода T развития системы КИО на равные промежутки времени $\Delta t_i \in T$ (годы).

Далее, согласно возможным срокам начала и продолжительности реализации частных программ, генерируются случайные варианты структур общей программы развития системы КИО.

Для каждого сгенерированного варианта структуры проверяются сформулированные выше необходимые условия реализуемости (по полноте охвата решаемых задач, избыточности частных программ, наличию необходимых для их реализации условий и ресурсов) на всех промежутках времени развития системы. Вариант, удовлетворяющий всем необходимым условиям, включается в множество возможных структур.

При формировании вариантов в разработанной вычислительной процедуре не допускается их повторение.

Работа алгоритма завершается формированием множества $G = \{G_v\}, v = \overline{1, V}$ возможных вариантов структур программы развития системы КИО заданной размерности.

4. Алгоритм выбора параметров устойчивого сбалансированного развития системы КИО

Для решения задачи выбора параметров устойчивого сбалансированного развития системы КИО предлагается новый алгоритм, представляющий собой модифицированный алгоритм конкурирующих точек, использующий байесовскую процедуру направленного глобального случайного поиска с обучением.

Согласно предлагаемому алгоритму, определение параметров $\vec{y}_{opt}(t)$ сбалансированного устойчивого развития системы КИО осуществляется на основе синтеза программы развития, обладающей оптимальной структурой и параметрами (составом частных программ в составе общей программы развития системы КИО и количеством объектов, эксплуатируемых в составе космических систем (комплексов) различного целевого назначения на различных промежутках времени $\Delta t_i \in T$ планируемого периода T развития системы КИО).

Сущность предлагаемого алгоритма заключается в следующем.

1. На начальном этапе работы алгоритма с использованием описанного выше алгоритма формируется множество $G = \{G_s\}, s = \overline{1, S}$ возможных вариантов структур программы развития системы КИО.

2. Для каждого из всех полученных в п.1 вариантов реализации частных программ развития с использованием моделей оценки показателей эффективности процессов функционирования и развития системы КИО определяются:

- функции распределения дисбалансов $\Psi_{q_j}(\vec{x}(t), \vec{Z}(t), W_j^{*n}(t), \vec{y}_{jmv}(t), t_i)$;
- функции распределения затрат, необходимых для реализации программ $\Upsilon_{C_m}(\vec{x}(t), \vec{Z}(t), W_j^{*n}(t), \vec{y}_{jmv}(t), t_i)$;
- вероятности возникновения дисбалансов $p_j(q_j(\vec{x}(t), \vec{Z}(t), W_j^{*n}(t), \vec{y}_{jmv}(t), t_i) > 0)$;
- математические ожидания дисбалансов $m_{q_j}(\vec{x}(t), \vec{Z}(t), W_j^{*n}(t), \vec{y}_{jmv}(t), t_i)$;
- риски дисбалансов $r_{q_j}(\vec{x}(t), \vec{Z}(t), W_j^{*n}(t), \vec{y}_{jmv}(t), t_i)$.

3. Реализуется первый цикл эволюционного алгоритма.

Из сформированного в п. 1 множества $G = \{G_s\}, s = \overline{1, S}$ случайным образом выбираются $L = \eta + \lambda_0$ вариантов структуры программы развития системы КИО (конкурирующих точек). При этом не допускаются повторения.

Затем для каждого сгенерированного варианта реализации программы развития системы КИО решается задача параметрической оптимизации по выбору оптимальных значений $n_{m_1, opt}^p \in N_{m_1, v}^p, n_{m_2, opt}^n \in N_{m_2, v}^n$ вариантов решений по штатному количеству объектов в составе эксплуатируемых и перспективных КС (КК), где $m_1 = 1, M_{1s}^*, m_2 = 1, M_{2s}^*$.

Задача параметрической оптимизации решается с использованием алгоритма направленного глобального случайного поиска с обучением, основанного на бай-

есовской процедуре, реализуемого по следующей схеме.

3.1. С использованием датчиков случайных величин по априорным бета-распределениям $\Xi_{m_1}(n_{m_1, s}^p), \Xi_{m_2}(n_{m_2, s}^n)$ производится генерация U случайных значений параметров $n_{m_1, s}^p$ и $n_{m_2, s}^n$ для каждой частной программы, входящей в рассматриваемую структуру G_s программы развития системы КИО.

3.2. Далее, для каждого u -го варианта значений параметров ($u = \overline{1, U}$) программы s -структуры с использованием результатов расчетов, полученных в п. 3 данного алгоритма, рассчитываются значения функции $\Upsilon_{C_2}(\vec{x}(t), \vec{Z}(t), \vec{W}^{*n}(t), \vec{y}_{su}(t), t_i)$ распределения суммарных годовых затрат на реализацию всей программы развития системы КИО в целом. Если хотя бы на одном из интервалов времени развития $t_i \in T$ системы КИО не выполняется условие: $\vec{R}_\beta(\vec{x}(t), \vec{Z}(t), \vec{W}^{*n}(t), \vec{y}_{su}(t), t_i) \leq \vec{R}_{don}(t_i)$ (ограничение по располагаемым ресурсам), то анализируемый вариант бракуется, т.е. считается нереализуемым (неудачным), в противном случае – определяется значение целевой функции I_{su} :

$$I_{su} = r_\Sigma(\vec{x}(t), \vec{Z}(t), \vec{W}^{*n}(t), \vec{y}_{su}(t), t_k),$$

$t_k \in T$

где $r_\Sigma(\cdot)$ – суммарный риск дисбалансов при решении системой КИО всех целевых задач на промежутке времени $t_k \in T$.

3.3. Производится ранжирование сгенерированных вариантов по критерию минимума суммарного риска дисбалансов системы КИО на интервале времени её развития (целевой функции). Варианты, обеспечивающие значение данного показателя на уровне не более 10–15% от достигнутого минимального значения (в пределах погрешности), считаются успешными, а остальные – неуспешными.

3.4. С использованием байесовской процедуры объединения априорной и опытной информации вычисляются апостериорные функции распределения для параметров (характеристик) частных программ развития системы КИО. В качестве аппроксимирующей функции при этом используется функция бета-распределения.

Если рассматриваемая структура программы развития КИО (конкурирующая точка) в последующих циклах работы эволюционного алгоритма будет сохраняться как успешная (не отклоняться), то апостериорные распределения, вычисленные на предыдущем цикле алгоритма, будут являться исходными (априорными) для получения новых апостериорных распределений.

Условием прекращения уточнения (циклов обучения) для анализируемого варианта структуры про-

граммы развития системы КИО является стабилизация параметров распределений характеристик частных программ и достигнутого значения целевой функции.

В результате параметрической оптимизации определяются значения целевой функции (суммарного риска дисбалансов системы КИО) для каждого сгенерированного варианта структуры программы развития системы КИО (конкурирующей точки).

3.5. Полученный массив значений целевой функции $(I_1, I_2, \dots, I_\eta, \dots, I_L)$ упорядочивается по убыванию. Из L точек отбирается η точек, имеющих наилучшие (наименьшие) значения, которые в дальнейшем называются основными, а остальные $\lambda_0 = L - \eta$ точек бракуются.

3.6. Запоминается наихудшее значение целевой функции для основных точек

$$\varphi_0 = \max (I_1, I_2, \dots, I_\eta), \quad i = \overline{1, \eta}.$$

4. Для реализации нового цикла эволюционного алгоритма синтезируется (генерируется) λ_0 дополнительных конкурирующих точек (структур программы

развития системы КИО). При этом допускаются лишь неповторяющиеся составы (наборы) частных программ развития и фазовых переходов [1] в процессе развития системы КИО.

Для η имеющихся и λ_0 сгенерированных дополнительно конкурирующих точек выполняются операторы, указанные в п. 2 алгоритма. Таким образом, определяется новая совокупность основных конкурирующих точек и новое значение φ_0 .

5. Цикл по п. 3 повторяется до получения не улучшаемого набора конкурирующих точек, из которого выбирается наилучший вариант, соответствующий минимальному значению суммарного риска дисбалансов системы КИО в программном периоде T .

6. Полученные результаты решения оптимизационной задачи в виде синтезированной программы и выбранных параметров $\vec{y}_{opt}(t)$ устойчивого сбалансированного развития системы КИО выводятся на экран и печать.

Литература

1. Поповкин В.А. Методический подход к решению задачи выбора параметров развития системы космического информационного обеспечения ВС РФ. Журнал «Двойные технологии», № 3, 2009 г.
2. Поповкин В.А. Методический подход к формированию и оценке показателей эффективности процессов функционирования и развития системы космического информационного обеспечения. Журнал «Авиакосмическое приборостроение», 2009 г. (в печати).
3. Богданов Ю.В., Шаргин Ю.Г., Лут М.А. Методический подход к определению оптимальной структуры процесса наземной экспериментальной отработки перспективных космических аппаратов длительного функционирования и их составных частей. – М.: НИИЦПТ МИА, «Двойные технологии» № 4, 2005, с.2–9.
4. Гладков Л.А., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Под ред. Курейчика В.М. – 2 изд., – М ФИЗ-МАТЛИТ, 2006 г., 320 с.
5. Богданов Ю.В. Проблема повышения эффективности отработки эксплуатационно-технических характеристик РКК и метод её решения. – М.: НИИЦПТ МИА «Двойные технологии», № 2, 2001 г., с.20–23.

Материал поступил в редакцию 30. 05. 2009 г.