

ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ И ОГРАНИЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

О. Л. ШЕСТОПАЛОВА

*Московский авиационный институт, филиал „Восход“, 468320, г. Байконур, Казахстан
E-mail: netan2004@mail.ru*

Рассматриваются вопросы формирования аналитических выражений для описания целевых функций и ограничений в задаче поиска оптимальных параметров функциональной и технической структур распределенной двухуровневой системы сбора и обработки информации о техническом состоянии космических аппаратов. Применен математический аппарат функционально-структурного синтеза сложных систем, основывающийся на многокритериальных моделях дискретного программирования. Конкретизирован состав обобщенных векторов структурных параметров системы и ее элементов, представлены в формализованном виде выражения для целевых функций и ограничений.

Ключевые слова: *система сбора и обработки информации, космический аппарат, структурный синтез, многокритериальное дискретное программирование*

В настоящее время ранее созданные и введенные в эксплуатацию системы сбора и обработки информации (ССОИ) о техническом состоянии космических аппаратов (КА) нередко отстают от изменившихся требований к составу и качеству выполняемых функций [1, 2]. Для компенсации отставания необходимо принимать и реализовывать решения по эволюционному развитию информационных систем (ИС). Данные решения должны быть обоснованы количественно [3—6], что требует соответствующего математического аппарата.

В настоящей статье рассматриваются особенности формирования аналитических выражений для описания целевых функций и ограничений в задаче поиска оптимальных параметров функциональной и технической структур распределенной двухуровневой системы сбора и обработки информации о техническом состоянии космических аппаратов. Применен математический аппарат, основывающийся на многокритериальной модели дискретного программирования [7].

Объектом исследования является двухуровневая распределенная иерархическая система контроля параметров технического состояния бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (далее — информационная система), включающая в себя два уровня базисных подсистем: I уровень — базисные подсистемы наземного базирования (размещенные на предприятиях и космодромах); II уровень — базисные подсистемы орбитального базирования (размещенные на космических аппаратах) [8].

Введем совокупность показателей, по которым оценивается эффективность функционирования ИС при различных вариантах ее структуры: $\Pi_{ДК}$ — показатель достоверности контроля параметров технического состояния БА КА; $\Pi_{ВК}$ — показатель среднего времени контроля параметров технического состояния БА КА; $\Pi_{ПСК}$ — показатель пропускной способности системы контроля параметров технического состояния БА КА; $\Pi_{СС}$ — показатель стоимости системы; $\Pi_{ЗЭ}$ — показатель затрат на эксплуатацию; $\Pi_{НС}$ — показатель надежности системы; $\Pi_{СУО}$ — показатель степени унификации оборудования системы.

Введем также совокупность ограничений при выборе предпочтительного варианта структуры системы: $\mathbf{O}_{Ц(ТР)}$ — ограничения по целесообразности и (или) технической реализуемости задач и размещения оборудования на базисных подсистемах; $\mathbf{O}_{Л(ТС)}$ — ограничения по логической или технической совместимости образцов оборудования; $\mathbf{O}_{М(Г)}$ — ограничения по суммарной массе и габаритам; $\mathbf{O}_{СПЭ}$ — ограничения по суммарному энергопотреблению; $\mathbf{O}_{КОП}$ — ограничения по количеству обслуживающего персонала; $\mathbf{O}_{ЗМСС}$ — ограничения по запасу остаточного морального срока службы.

Для формирования аналитических выражений для описания целевых функций и ограничений необходимо задать следующие исходные данные.

1. Множество задач $A = \{a_s\}_{s \in S}$, которые решаются ИС.
2. Множество алгоритмов A' , с помощью которых осуществляется решение задач. Для каждого алгоритма a_s заданы: затраты на реализацию алгоритма в течение некоторого периода α_s^3 , среднее число операций α_s^0 , выполняемых во время работы, необходимый объем оперативной памяти $\alpha_s^П$.
3. Множество базисных подсистем нижнего (первого) уровня иерархии $P = \{p_v\}_{v \in V}$.
4. Множество базисных подсистем верхнего (второго) уровня иерархии $F = \{f_q\}_{q \in Q}$.
5. Граф логических связей между алгоритмами с матрицей смежности E^A :

$$E^A = \begin{pmatrix} 0 & e_{12} & \dots & e_{1s} \\ e_{21} & 0 & \dots & e_{2s} \\ & & \dots & \\ e_{s1} & e_{s2} & \dots & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$e_{ss'} = \begin{cases} 1, & \text{если алгоритм } a_{s'} \text{ выполняется после алгоритма } a_s, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

6. Множество типов наземных автоматизированных рабочих мест (АРМ) (серверов) $U = \{u_j\}_{j \in J}$, которые могут быть использованы для решения задач в системе на нижнем уровне иерархии. Для каждого типа АРМ заданы стоимость β_j^c , затраты на эксплуатацию в течение некоторого периода β_j^3 , быстродействие β_j^6 , объем оперативной памяти $\beta_j^П$, характеристика надежности β_j^H (например, вероятность безотказной работы в течение некоторого периода).

7. Множество типов БЦВМ (бортовых процессоров) $B = \{b_k\}_{k \in K}$, предназначенных для функционирования на верхнем уровне иерархии ИС. Для БЦВМ помимо задания характеристик $\gamma_k^c, \gamma_k^6, \gamma_k^П, \gamma_k^H$, аналогичных характеристикам для наземных АРМ, требуется знание и некоторых других параметров (например, массы γ_k^M , габаритных размеров $\gamma_k^Г$, уровня энергопотребления $\gamma_k^{ЭП}$).

8. Множество типов систем передачи данных (СПД) $D = \{d_m\}_{m \in M}$ со следующими параметрами: стоимость δ_m^c , затраты на эксплуатацию в течение некоторого периода δ_m^3 , скорость передачи информации δ_m^H , вероятность безотказной работы δ_m^H , степень достоверности передачи информации $\delta_m^Д$, масса δ_m^M , габариты $\delta_m^Г$, уровень энергопотребления $\delta_m^{ЭП}$.

9. Множество типов технических средств (ТС) контроля (датчиков, средств и систем измерений параметров технического состояния) $R = \{r_l\}_{l \in L}$ с соответствующими характеристиками: степень достоверности контроля ξ_l^D , стоимость ξ_l^C , затраты на эксплуатацию $\xi_l^Э$, вероятность безотказной работы ξ_l^H , масса ξ_l^M , габариты $\xi_l^Г$, уровень энергопотребления $\xi_l^{ЭП}$, перечень $\omega_l = \{\omega_l^1, \omega_l^2, \dots, \omega_l^{k_1}\}$ элементарных операций по контролю технического состояния БА КА.

10. Булевы переменные x_{vs} и x_{qs} , характеризующие распределение текущих и перспективных задач s по соответствующим базисным подсистемам v (I уровня) и q (II уровня) ИС.

11. Булевы переменные $x_{vv'm}$, $x_{qq'm}$ и x_{vqm} , характеризующие наличие прямых каналов связи определенного типа m между базисными подсистемами одного уровня и разных уровней ИС.

12. Булевы подвекторы, представляющие собой транспонированные бинарные коды количества средств определенного типа, устанавливаемых на рассматриваемой базисной подсистеме (типа l — для технических средств, типа j — для АРМ, типа k — для процессоров, типа m — для СПД). Например,

$$x_{qm} = (x_{qm}^1, x_{qm}^2, \dots, x_{qm}^{N_4'})^T = \begin{cases} (1, 1, \dots, 1)^T, & \text{если в } q\text{-й подсистеме} \\ & \text{устанавливается } 2^{N_4'-1} \text{ СПД типа } m; \\ \vdots \\ (0, 0, \dots, 0)^T, & \text{если в } q\text{-й подсистеме} \\ & \text{устанавливается 1 СПД типа } m; \\ (0, 0, \dots, 0)^T, & \text{если в } q\text{-й подсистеме не} \\ & \text{устанавливается СПД типа } m. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом введенных обозначений функциональная структура ИС, определяющая распределение функциональных задач по базисным подсистемам, описывается вектором

$$\mathbf{X}_{<n'>}^{\Phi C} = \langle x_{vs}, x_{qs} \rangle, \quad (3)$$

а техническая структура ИС — вектором

$$\mathbf{X}_{<n''>}^{\Gamma C} = \langle x_{vv'm}, x_{qq'm}, x_{vqm}, x_{vl}, x_{ql}, x_{vj}, x_{qk}, x_{vm}, x_{qm} \rangle. \quad (4)$$

Все параметры распределения задач (алгоритмов), технических, вычислительных средств и каналов передачи данных между базисными компонентами могут быть сведены в обобщенный вектор параметров функциональной и технической структур системы (ПСС):

$$\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}} = \langle x_{vs}, x_{qs}, x_{vv'm}, x_{qq'm}, x_{vqm}, x_{vl}, x_{ql}, x_{vj}, x_{qk}, x_{vm}, x_{qm} \rangle. \quad (5)$$

Вектор показателей эффективности функционирования ИС с учетом введенных обозначений обобщенных векторов (3) и (5) можно записать как

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{<7>}^{\Phi C}(\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}}, \eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}) = & \langle \mathbf{П}_{\text{ДК}}(\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}}, \eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}), \mathbf{П}_{\text{ВК}}(\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}}, \eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}), \mathbf{П}_{\text{ПСК}}(\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}}, \eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}), \\ & \mathbf{П}_{\text{СС}}(\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}}, \eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}), \mathbf{П}_{\text{ЗЭ}}(\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}}, \eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}), \mathbf{П}_{\text{НС}}(\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}}, \eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}), \mathbf{П}_{\text{СУО}}(\mathbf{X}_{<n>}^{\text{ПСС}}, \eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}) \rangle, \end{aligned} \quad (6)$$

здесь $\eta_{<n''>}^{\text{ПЭС}}$ — показатель, характеризующий параметры элементов системы.

Задачу функционально-структурного синтеза ИС в компактном виде сформулируем как нахождение такого рационального значения компонент обобщенного вектора $\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}^*}$, при котором в условиях наложенных ограничений [9] достигается предпочтительное значение вектора

$$\mathfrak{E}_{\langle 7 \rangle}^{\text{ФС}}(\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}, \eta_{\langle n^m \rangle}^{\text{ПЭС}}) \rightarrow \underset{\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}} \in \Delta_{\beta} \subset B^n}{\text{extr}}, \quad (7)$$

где B^n — множество всех векторов с булевыми компонентами размерности n , а Δ_{β} — подмножество булевых векторов, удовлетворяющих системе ограничений

$$\mathbf{O}_{\langle 6 \rangle} = \langle \mathbf{O}_{\text{Ц(ТР)}}; \mathbf{O}_{\text{Л(ТС)}}; \mathbf{O}_{\text{М(Г)}}; \mathbf{O}_{\text{СПЭ}}; \mathbf{O}_{\text{КОП}}; \mathbf{O}_{\text{ЗМСС}} \rangle. \quad (8)$$

Далее представим формально в терминах булевых переменных и булевых подвекторов аналитические выражения для вычисления значений частных показателей (6), по которым оценивается эффективность функционирования системы при различных вариантах ее структуры, а также аналитические выражения для проверки выполнения системы ограничений (8) при выборе предпочтительного варианта структуры системы.

Примем следующее допущение: основными причинами недостоверности контроля параметров технического состояния БА КА являются погрешности измерения их значений с помощью датчиков (средств измерений, систем измерений) и погрешности преобразования и передачи результатов измерений по каналам СПД. Погрешностями обработки информации АРМ и БЦВМ пренебрегаем. Показателем достоверности элементарной операции можно считать величину, обратную погрешности вычислений на данной операции, определенную для заданного уровня доверительной вероятности.

Количество технических средств, задействованных при решении s -й задачи в v -й базисной подсистеме I уровня, используя обозначения (1)—(5), определим как

$$V_{vs}^{\text{ТС}} = \sum_{i=1}^{N_1} x_{vi}^i 2^{N_1-i}.$$

Соответственно количество технических средств, задействованных при решении s -й задачи в q -й базисной подсистеме II уровня, определяется как

$$V_{qs}^{\text{ТС}} = \sum_{i=1}^{N'_1} x_{qi}^i 2^{N'_1-i}.$$

Рассчитаем количество каналов передачи данных, задействованных при решении s -й задачи в v -й и q -й базисных подсистемах соответственно:

$$V_{vs}^{\text{СПД}} = \sum_{i=1}^{N_4} x_{vm}^i 2^{N_4-i}, \quad V_{qs}^{\text{СПД}} = \sum_{i=1}^{N'_4} x_{qm}^i 2^{N'_4-i}.$$

Тогда показатели достоверности решения s -й задачи в v -й и q -й базисных подсистемах соответственно могут быть рассчитаны как

$$\Psi_{vs}^{\text{Д}} = \left(\sum_{l=1}^{V_{vs}^{\text{ТС}}} (\xi_l^{\text{Д}})^{-2} + \sum_{m=1}^{V_{vs}^{\text{СПД}}} (\delta_m^{\text{Д}})^{-2} \right)^{-1/2},$$

$$\Psi_{qs}^{\text{Д}} = \left(\sum_{l=1}^{V_{qs}^{\text{ТС}}} (\xi_l^{\text{Д}})^{-2} + \sum_{m=1}^{V_{qs}^{\text{СПД}}} (\delta_m^{\text{Д}})^{-2} \right)^{-1/2}.$$

Показатель достоверности решения s -й задачи в системе в целом оценивается как

$$\Psi_s^{\text{Д}} = \left(\sum_{v \in I} x_{vs} (\Psi_{vs}^{\text{Д}})^{-2} + \sum_{q \in Q} x_{qs} (\Psi_{qs}^{\text{Д}})^{-2} \right)^{-1/2}.$$

Интегральный показатель $\Pi_{\text{ДК}}$, который по своему смыслу является обобщенной количественной оценкой достоверности решения полного перечня задач в синтезируемой системе, можно оценить с помощью взвешенной суммы показателей достоверности решения частных задач:

$$\Pi_{\text{ДК}} = \sum_{s \in S} \kappa_s \Psi_s^{\text{Д}}, \quad (9)$$

где κ_s — коэффициент относительной важности s -й частной задачи, принадлежащей множеству задач S , решаемых в системе, $\sum_{s \in S} \kappa_s = 1$.

Среднее время контроля параметров технического состояния БА КА можно оценить, если учесть соответствующие затраты времени на две основные составляющие процесса контроля: затраты времени $\Pi_{\text{БК}}^{\text{ПЗ}}$ — на решение задач $s \in S^{\text{ТЦК}}$, непосредственно выполняемых при типовом цикле контроля, и затраты времени $\Pi_{\text{БК}}^{\text{ОИ}}$ на обмен информацией между базисными подсистемами:

$$\Pi_{\text{БК}} = \Pi_{\text{БК}}^{\text{ПЗ}} + \Pi_{\text{БК}}^{\text{ОИ}}. \quad (10)$$

Первую составляющую оценим как

$$\Pi_{\text{БК}}^{\text{ПЗ}} = \sum_{v \in V} \sum_{s \in S^{\text{ТЦК}}} \left(\sum_{j: \alpha_s^{\text{П}} \leq \beta_j^{\text{П}}} \beta_j^{\text{П}} \sum_{i=1}^{N_2} x_{vj}^i 2^{N_2-i} \right)^{-1} \alpha_s^0 x_{vs} + \sum_{v \in V} \sum_{s \in S^{\text{ТЦК}}} \left(\sum_{j: \alpha_s^{\text{П}} \leq \gamma_k^{\text{П}}} \gamma_k^{\text{П}} \sum_{i=1}^{N_3} x_{qj}^i 2^{N_3-i} \right)^{-1} \alpha_s^0 x_{qs}, \quad (11)$$

а вторую составляющую — как

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{БК}}^{\text{ОИ}} = & \sum_{s \in S^{\text{ТЦУ}}} \sum_{s' \in S^{\text{ТЦУ}}} e_{ss'}^A \sum_{v \in V} \sum_{v' \in V} \alpha_s^B \left(\sum_{m \in M} \delta_m^{\text{И}} x_{vs} (1 - x_{vs'}) x_{v's'} x_{vv'm} \right)^{-1} + \\ & + \sum_{s \in S^{\text{ТЦУ}}} \sum_{s' \in S^{\text{ТЦУ}}} e_{ss'}^A \sum_{q \in V} \sum_{q' \in V} \alpha_s^B \left(\sum_{m \in M} \delta_m^{\text{И}} x_{qs} (1 - x_{qs'}) x_{q's'} x_{qq'm} \right)^{-1} + \\ & + \sum_{s \in S^{\text{ТЦУ}}} \sum_{s' \in S^{\text{ТЦУ}}} e_{ss'}^A \sum_{v \in V} \sum_{q' \in Q} \alpha_s^B \left(\sum_{m \in M} \delta_m^{\text{И}} x_{vs} (1 - x_{vq'}) x_{v'q'} x_{vq'm} \right)^{-1}, \quad (12) \end{aligned}$$

где α_s^B — объем выходной информации s -го алгоритма.

Первое слагаемое в выражении (12) равно затратам времени на обмен информацией между базисными подсистемами I уровня, второе — между базисными подсистемами II уровня, третье — отражает затраты времени на обмен информацией между базисными подсистемами I и II уровней.

Таким образом, итоговые обобщенные затраты времени $\Pi_{\text{БК}}$ рассчитываются согласно (11) и (12).

Показатель $\Pi_{\text{ПСК}}$ может быть измерен предельным количеством типовых циклов контроля, которое система способна обеспечить за некоторый интервал времени (например, за сутки).

В силу распределенности и одновременности выполнения операций контроля на обоих иерархических уровнях системы суммарная пропускная способность системы складывается из двух составляющих:

$$\Pi_{\text{ПСК}} = \Pi_{\text{ПСК}}^1 + \Pi_{\text{ПСК}}^2, \quad (13)$$

где $\Pi_{\text{ПСК}}^1$ — пропускная способность базисных подсистем наземного базирования, $\Pi_{\text{ПСК}}^2$ — пропускная способность базисных подсистем орбитального базирования:

$$\Pi_{\text{ПСК}}^1 = \sum_{v \in V} \left[\sum_{l \in L} (t_{l1}^{\text{II}} + t_{l1}^{\text{K}})^{-1} \sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i 2^{N_1-i} + \sum_{j \in J} \beta_j^6 \sum_{i=1}^{N_2} x_{vj}^i 2^{N_2-i} + \sum_{m \in M} \delta_m^{\text{II}} x_{vm}^i 2^{N_4-i} \right],$$

$$\Pi_{\text{ПСК}}^2 = \sum_{q \in Q} \left[\sum_{l \in L} (t_{l2}^{\text{II}} + t_{l2}^{\text{K}})^{-1} \sum_{i=1}^{N'_1} x_{ql}^i 2^{N'_1-i} + \sum_{k \in K} \gamma_k^6 \sum_{i=1}^{N_3} x_{qk}^i 2^{N_3-i} + \sum_{m \in M} \delta_m^{\text{II}} x_{vm}^i 2^{N'_4-i} \right],$$

где t_{l1}^{II} , t_{l1}^{K} и t_{l2}^{II} , t_{l2}^{K} — время подготовки и выполнения типовой операции контроля состояния объекта l -м техническим средством в базисных подсистемах I и II уровня соответственно.

Показатель стоимости системы вычисляется как сумма стоимостей:

$$\Pi_{\text{СС}} = C_{\text{ТСН}} + C_{\text{АРМ}} + C_{\text{СПДН}} + C_{\text{ТСО}} + C_{\text{ПО}} + C_{\text{СПДО}} + C_{\text{АНКС}}, \quad (14)$$

где $C_{\text{ТСН}}$ — стоимость технических средств наземного базирования; $C_{\text{АРМ}}$ — стоимость АРМ наземного базирования; $C_{\text{СПДН}}$ — стоимость систем передачи данных наземного базирования; $C_{\text{ТСО}}$ — стоимость технических средств орбитального базирования; $C_{\text{ПО}}$ — стоимость вычислительных процессоров орбитального базирования; $C_{\text{СПДО}}$ — стоимость систем передачи данных орбитального базирования; $C_{\text{АНКС}}$ — стоимость аренды наземных каналов связи.

Значения перечисленных стоимостных компонентов, входящих в (14), можно рассчитать с помощью следующих выражений:

$$C_{\text{ТСН}} = \sum_{v \in V} \sum_{l \in L} \xi_l^c \sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i 2^{N_1-i};$$

$$C_{\text{АРМ}} = \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} \beta_j^c \sum_{i=2}^{N_2} x_{vj}^i 2^{N_2-i};$$

$$C_{\text{СПДН}} = \sum_{v \in V} \sum_{m \in M} \delta_m^c \sum_{i=1}^{N_4} x_{vm}^i 2^{N_4-i};$$

$$C_{\text{ТСО}} = \sum_{q \in Q} \sum_{l \in L} \xi_l^c \sum_{i=1}^{N'_1} x_{ql}^i 2^{N'_1-i};$$

$$C_{\text{ПО}} = \sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} \gamma_k^c \sum_{i=1}^{N_3} x_{qk}^i 2^{N_3-i};$$

$$C_{\text{СПДО}} = \sum_{q \in Q} \sum_{m \in M} \delta_m^c \sum_{i=1}^{N'_4} x_{qm}^i 2^{N'_4-i};$$

$$C_{\text{АНКС}} = \sum_{v \in V} \sum_{v' \in V} \sum_{m \in M} (\max \theta_{vv'm}) x_{vv'm},$$

где $\theta_{vv'm}$ — стоимость аренды (в течение жизненного цикла) канала связи между v -й и v' -й базисными подсистемами I уровня, качество которого соответствует СПД типа m .

Затраты $\Pi_{\text{ЗЭ}}$ на эксплуатацию системы определяются в основном затратами на поддержание в работоспособном состоянии наземного оборудования, так как оборудование базисных систем II уровня в силу специфики удаленного размещения является необслуживаемым.

Показатель $\Pi_{\text{ЗЭ}}$ вычисляется как сумма частных затрат:

$$\Pi_{\text{ЗЭ}} = S_{\text{ТСН}} + S_{\text{АРМ}} + S_{\text{СПДН}} + S_{\text{СПМО}}, \quad (15)$$

где $S_{\text{ТСН}}$ — затраты на эксплуатацию технических средств; $S_{\text{АРМ}}$ — затраты на эксплуатацию АРМ; $S_{\text{СПДН}}$ — затраты на эксплуатацию систем передачи данных; $S_{\text{СПМО}}$ — затраты на эксплуатацию специального программно-математического обеспечения.

Значения перечисленных затратных компонентов, входящих в (15), можно рассчитать с помощью следующих выражений:

$$S_{\text{TCH}} = \sum_{v \in V} \sum_{l \in L} \xi_l^3 \sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i 2^{N_1-i};$$

$$S_{\text{APM}} = \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} \beta_j^3 \sum_{i=1}^{N_2} x_{vj}^i 2^{N_2-i};$$

$$S_{\text{СПДН}} = \sum_{v \in V} \sum_{m \in M} \delta_m^3 \sum_{i=1}^{N_4} x_{vm}^i 2^{N_4-i};$$

$$S_{\text{СПМО}} = \sum_{s \in S} \alpha_s^3 \sum_{v \in V} x_{vs}.$$

Надежность системы Π_{HC} определяется на основе последовательной структурной схемы надежности как произведение показателей надежности наземного Π_{HC}^1 и орбитального Π_{HC}^2 компонентов системы:

$$\Pi_{\text{HC}} = \Pi_{\text{HC}}^1 \Pi_{\text{HC}}^2, \quad (16)$$

где

$$\Pi_{\text{HC}}^1 = \prod_{v \in V} \left\{ \prod_{l \in L} (\xi_l^H)^{\sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i 2^{N_1-i}} \prod_{j \in J} (\beta_j^H)^{\sum_{i=1}^{N_2} x_{vj}^i 2^{N_2-i}} \prod_{m \in M} (\delta_m^H)^{\sum_{i=1}^{N_4} x_{vm}^i 2^{N_4-i}} \right\},$$

$$\Pi_{\text{HC}}^2 = \prod_{q \in Q} \left\{ \prod_{l \in L} (\xi_l^H)^{\sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i 2^{N_1-i}} \prod_{k \in K} (\gamma_k^H)^{\sum_{i=1}^{N_3} x_{qk}^i 2^{N_3-i}} \prod_{m \in M} (\delta_m^H)^{\sum_{i=1}^{N_4} x_{qm}^i 2^{N_4-i}} \right\}.$$

Функционал (16) отражает стремление к использованию элементов структуры системы с наилучшими характеристиками надежности, но не отражает стремления к резервированию оборудования. Такой подход с определенной оговоркой может быть принят допустимым в многокритериальной постановке задачи синтеза структуры сложной системы, так как стремление к аппаратурной избыточности отражается функционалом (13).

Показатель степени унификации оборудования ИС определим с помощью функционала вида

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{СУО}} = & \sum_{v \in V} \left(|L| - \sum_{l \in L} y_{vl} \right) + \sum_{v \in V} \left(|J| - \sum_{j \in J} y_{vj} \right) + \sum_{v \in V} \left(|M| - \sum_{m \in M} y_{vm} \right) + \\ & + \sum_{q \in Q} \left(|K| - \sum_{k \in K} y_{qk} \right) + \sum_{v \in V} \sum_{v' > v} \left(\sum_{l \in L} y_{vl} y_{v'l} + \sum_{j \in J} y_{vj} y_{v'j} + \sum_{m \in M} y_{vm} y_{v'm} \right) + \\ & + \sum_{q \in Q} \sum_{q' > q} \left(\sum_{k \in K} y_{qk} y_{q'k} + \sum_{s \in S} y_{qs} y_{q's} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

где $y_{vi} = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i \right)$, $y_{vj} = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^{N_2} x_{vj}^i \right)$, $y_{vm} = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^{N_4} x_{vm}^i \right)$, $y_{qk} = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^{N_3} x_{qk}^i \right)$ — булевы переменные, отражающие наличие или отсутствие соответствующих типов технических средств, ЭВМ и алгоритмов в базисных подсистемах и на объектах управления.

В формуле (17) первые четыре суммы отражают стремление к минимальному количеству типов технических средств в базисных подсистемах наземного и орбитального базирова-

ния, а последние две суммы — стремление к минимальному различию этих базисных подсистем по типам технических средств (для орбитальных подсистем также по набору задач).

Рассмотрим теперь аналитические выражения для системы ограничений.

Ограничения по целесообразности и (или) технической реализуемости задач и размещения оборудования на базисных подсистемах предусматривают, что каждая задача должна решаться, по крайней мере, в одной базисной подсистеме I уровня или на всех базисных подсистемах II уровня:

$$\sum_{v \in V} x_{vs} + \prod_{q \in Q} x_{qs} \geq 1; \quad \forall s \in S.$$

Запрет на размещение некоторых типов технических средств в отдельных базисных подсистемах I и II уровней определяется соответственно следующими выражениями:

$$\sum_{l \in L_v^{\xi}} \sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i = 0; \quad \forall v \in V,$$

$$\sum_{l \in L_q^{\xi}} \sum_{i=1}^{N_1'} x_{ql}^i = 0; \quad \forall q \in Q,$$

где L_v^{ξ} и L_q^{ξ} — подмножества типов технических средств, размещение которых недопустимо в v -й и q -й базисных подсистемах соответственно.

Ограничениями по логической или технической совместимости образцов оборудования регламентируется объем оперативной памяти АРМ каждой базисной подсистемы I уровня, который должен быть достаточным для реализации алгоритмов:

$$\sum_{j \in J} \beta_j^{\Pi} \sum_{i=1}^{N_2} x_{vj}^i 2^{N_2-i} \geq \sum_{s \in S'} \alpha_s^{\Pi} x_{vs}; \quad \forall v \in V, \quad \forall S' \in S,$$

где S' — наборы алгоритмов, которые по технологии управления объектами должны работать одновременно.

Аналогичные ограничения для базисных подсистем II уровня определяются как

$$\sum_{k \in K} \gamma_k^{\Pi} \sum_{i=1}^{N_3} x_{qk}^i 2^{N_3-i} \geq \sum_{s \in S'_q} \alpha_s^{\Pi} x_{qs}; \quad \forall q \in Q, \quad \forall S'_q \in S_q.$$

Рассмотрим ограничения, вызванные взаимосвязями алгоритмов. При наличии в v -й базисной подсистеме s -го алгоритма и отсутствии s' -го алгоритма, такого что $e_{ss'}^A = 1$, v -я подсистема связывается прямым каналом связи с одной из подсистем, в которой имеется s' -й алгоритм:

$$\bigvee_{v' \in V} \left(e_{ss'}^A x_{vs} (1 - x_{v's'}) x_{v'm} \leq \sum_{m \in M} x_{v'm} \right); \quad \forall s, s' \in S, \quad \forall v \in V.$$

Ограничения по суммарной массе для размещаемых на базисных подсистемах II уровня технических средств контроля, бортовых процессоров и систем передачи данных определяются следующими выражениями:

$$\sum_{l \in L} \xi_l^M \sum_{i=1}^{N_1'} x_{ql}^i 2^{N_1'-i} \leq M_q^{\text{ТС}};$$

$$\sum_{k \in K} \gamma_k^M \sum_{i=1}^{N_3} x_{qk}^i 2^{N_3-i} \leq M_q^{\text{БП}};$$

$$\sum_{m \in M} \delta_m^M \sum_{i=1}^{N_4'} x_{qm}^i 2^{N_4'-i} \leq M_q^{\text{СПД}},$$

где M_q^{TC} , $M_q^{БП}$ и $M_q^{СПД}$ — максимально допустимая суммарная масса соответственно ТС, БЦВМ и оборудования СПД, размещаемых на q -й базисной подсистеме.

Ограничения по габаритам для размещаемых на базисных подсистемах II уровня технических средств контроля, бортовых процессоров и систем передачи данных определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \sum_{l \in L} \xi_l^\Gamma \sum_{i=1}^{N'_1} x_{ql}^i 2^{N'_1-i} &\leq \Gamma_q^{TC}; \\ \sum_{k \in K} \gamma_k^\Gamma \sum_{i=1}^{N_3} x_{qk}^i 2^{N_3-i} &\leq \Gamma_q^{БП}; \\ \sum_{m \in M} \delta_m^\Gamma \sum_{i=1}^{N'_4} x_{qm}^i 2^{N'_4-i} &\leq \Gamma_q^{СПД}, \end{aligned}$$

где Γ_q^{TC} , $\Gamma_q^{БП}$ и $\Gamma_q^{СПД}$ — максимально допустимые габариты ТС, БЦВМ и оборудования СПД, размещаемых на q -й базисной подсистеме.

Ограничения по суммарному энергопотреблению для размещаемых на базисных подсистемах II уровня технических средств контроля, бортовых процессоров и систем передачи данных определяются соответственно следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \sum_{l \in L} \xi_l^{\text{ЭП}} \sum_{i=1}^{N'_1} x_{ql}^i 2^{N'_1-i} &\leq E_q^{TC}; \\ \sum_{k \in K} \gamma_k^{\text{ЭП}} \sum_{i=1}^{N_3} x_{qk}^i 2^{N_3-i} &\leq E_q^{БП}; \\ \sum_{m \in M} \delta_m^{\text{ЭП}} \sum_{i=1}^{N'_4} x_{qm}^i 2^{N'_4-i} &\leq E_q^{СПД}, \end{aligned}$$

где E_q^{TC} , $E_q^{БП}$ и $E_q^{СПД}$ — максимально допустимое энергопотребление ТС, БЦВМ и оборудования СПД, размещаемых на q -й базисной подсистеме.

Согласно ограничениям по количеству обслуживающего персонала на объектах наземного базирования численность личного состава инженерно-технического профиля в каждой базисной подсистеме ограничена величинами N_v ($v \in V$), а в целом по системе ограничения по количеству персонала заданы по категориям специалистов: N^v — системотехники, N^R — специалисты по техническим средствам, N^D — специалисты по СПД, N^S — программисты (применение s -го алгоритма, $s \in S$). Таким образом, ограничения по количеству личного состава можно записать в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} \sum_{l \in L} n_l \sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i 2^{N_1-i} + \sum_{j \in J} n_j \sum_{i=1}^{N_2} x_{vj}^i 2^{N_2-i} + \sum_{m \in M} n_m \sum_{i=1}^{N_4} x_{vm}^i 2^{N_4-i} + \\ + \sum_{s \in S} n_s^v x_{vs} \leq N^v, \quad \forall v \in V; \\ \sum_{v \in V} \sum_{l \in L} n_l \sum_{i=1}^{N_1} x_{vl}^i 2^{N_1-i} \leq N^R; \\ \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} n_j \sum_{i=1}^{N_2} x_{vj}^i 2^{N_2-i} \leq N^v; \\ \sum_{v \in V} \sum_{m \in M} n_m \sum_{i=1}^{N_4} x_{vm}^i 2^{N_4-i} \leq N^D; \end{aligned}$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{s \in S} n_s^v \leq N^S,$$

где n_l, n_j, n_m — количество обслуживающего персонала для эксплуатации соответствующих образцов техники, n_s^v — количество программистов (по применению s -го алгоритма в v -й базисной подсистеме I уровня).

Ограничения по запасу остаточного срока экономического устаревания ИС [10, 11] определяются как

$$T_\gamma^{\text{MCC}_I} = \Phi_I^{\text{MCC}}(\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}, \eta_{\langle n'' \rangle}^{\text{ПЭС}}) \leq T_{\text{ССОИ}}^{\text{ЖЦ}},$$

где $T_\gamma^{\text{MCC}_I}$ — прогнозируемое значение γ -процентного запаса срока экономического устаревания ИС; $\Phi_I^{\text{MCC}}(\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}, \eta_{\langle n'' \rangle}^{\text{ПЭС}})$ — математическая модель прогнозирования остаточного срока экономического устаревания ИС со структурой $\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}$ и параметрами элементов $\eta_{\langle n'' \rangle}^{\text{ПЭС}}$; $T_{\text{ССОИ}}^{\text{ЖЦ}}$ — планируемая длительность жизненного цикла ИС.

Ограничения по запасу остаточного срока функционального устаревания ИС [10, 12] определяются как

$$T_\gamma^{\text{MCC}_{II}} = \Phi_{II}^{\text{MCC}}(\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}, \eta_{\langle n'' \rangle}^{\text{ПЭС}}) \leq T_{\text{ССОИ}}^{\text{ЖЦ}},$$

где $T_\gamma^{\text{MCC}_{II}}$ — прогнозируемое значение γ -процентного запаса остаточного срока функционального устаревания; $\Phi_{II}^{\text{MCC}}(\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}, \eta_{\langle n'' \rangle}^{\text{ПЭС}})$ — математическая модель прогнозирования остаточного срока функционального устаревания ИС со структурой $\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}$ и параметрами элементов $\eta_{\langle n'' \rangle}^{\text{ПЭС}}$.

Ограничения по запасу остаточного срока деградации ресурсной отказоустойчивости ИС [10, 13] характеризуются выражениями

$$T_\gamma^{\text{MCC}_{III}} = \Phi_{III}^{\text{MCC}}(\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}, \eta_{\langle n'' \rangle}^{\text{ПЭС}}) \leq T_{\text{ССОИ}}^{\text{ЖЦ}},$$

где $T_\gamma^{\text{MCC}_{III}}$ — прогнозируемое значение γ -процентного остаточного срока деградации ресурсной отказоустойчивости ИС; $\Phi_{III}^{\text{MCC}}(\mathbf{X}_{\langle n \rangle}^{\text{ПСС}}, \eta_{\langle n'' \rangle}^{\text{ПЭС}})$ — математическая модель прогнозирования остаточного срока деградации ресурсной отказоустойчивости ИС.

Итак, рассмотрена задача формирования предпочтительного состояния информационной системы на примере синтеза структуры двухуровневой распределенной системы контроля параметров бортовой аппаратуры космических аппаратов в процессе их жизненного цикла. Применен математический аппарат функционального-структурного синтеза сложных систем, основывающийся на многокритериальных моделях дискретного программирования. Конкретизирован состав обобщенных векторов структурных параметров системы и ее элементов. Применительно к предметной области представлены в формализованном виде аналитические выражения для целевых функций и ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митчелл Р. Моральный износ и как с ним бороться // Computerworld Россия. 2008. № 32 [Электронный ресурс]: <<http://www.osp.ru/cw/2008/32/5462756/>>.
2. Дорохов А. Н., Миронов А. Н., Шестопалова О. Л. Определение потребности в модернизации средств технического обеспечения распределенной системы сбора и обработки информации // Информация и космос. 2014. № 1. С. 9—12.

3. Анкудинов Г. И. Синтез структуры сложных объектов: Логико-комбинаторный подход. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 260 с.
4. Раков Д. Л. Структурный анализ и синтез новых технических систем на базе морфологического подхода. М.: Либроком, 2011. 160 с.
5. Цвиркун А. Д. Основы синтеза структур сложных систем. М.: Наука, 1982. 200 с.
6. Цыгичко В. Н., Попович А. Ю. Синтез иерархических систем управления: Теория и практика. М.: Изд-во „Красанд“, 2012. 256 с.
7. Резников Б. А. Методы и алгоритмы оптимизации на дискретных моделях сложных систем. Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1983. 250 с.
8. Лоскутов А. И., Патраков С. С., Шестопалова О. Л. Интеллектуальная информационно-диагностическая система оценивания технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов при подготовке их к запуску // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 18—24.
9. Балашов Е. П. Эволюционный синтез систем. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
10. Муравьев А. В., Шестопалова О. Л. Прогнозирование морального старения информационной системы: Монография. М.: Московский печатник, 2014. 88 с.
11. Клепов А. В., Миронов Е. А., Шестопалова О. Л. Обеспечение технико-экономической эффективности эксплуатации распределенной информационной системы // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2014. № 5(21) [Электронный ресурс]: <http://iea.gostinfo.ru/files/2014_05/2014_05_13.pdf>.
12. Шестопалова О. Л. Прогнозирование степени функционального устаревания информационных систем на основе экстраполяции нечетких экспертных оценок // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 312—319.
13. Шестопалова О. Л. Прогнозирование моральной долговечности распределенных информационных систем с учетом прогрессирующих ограничений на возможности восстановления ресурса элементной базы // Современные проблемы науки и образования. 2003 [Электронный ресурс]: <<http://www.science-education.ru/113-11078>>.

Сведения об авторе

Ольга Львовна Шестопалова — канд. техн. наук, доцент; Московский авиационный институт, филиал „Восход“; факультет испытаний летательных аппаратов;
E-mail: neman2004@mail.ru

Поступила в редакцию
05.07.19 г.

Ссылка для цитирования: Шестопалова О. Л. Целевые функции и ограничения в задаче структурного синтеза систем сбора и обработки информации о техническом состоянии космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 958—969.

OBJECTIVE FUNCTIONS AND CONSTRAINTS IN THE PROBLEM OF STRUCTURAL SYNTHESIS OF SYSTEMS FOR COLLECTING AND PROCESSING INFORMATION ON SPACECRAFT TECHNICAL CONDITION

O. L. Shestopalova

*Moscow Aviation Institute, „Voskhod“ Branch, 468320, Baikonur, Kazakhstan
E-mail: neman2004@mail.ru*

Formulation of analytical expressions to describe the objective functions and limitations in the task of finding the optimal structure parameters of distributed two-level information system for collecting and processing information on the technical condition of a spacecraft is considered. The mathematical apparatus of the functional-structural synthesis of complex systems is applied, based on multi-criteria discrete programming models. The composition of the generalized vectors of structural parameters of the system and its elements is specified, and formalized expressions for objective functions and constraints are presented.

Keywords: information acquisition and processing system, spacecraft, structural synthesis, multicriterial discrete programming

REFERENCES

1. Mitchell R. *Computer world Rossiya*, 2008, no. 32, <http://www.osp.ru/cw/2008/32/5462756/>. (in Russ.)
2. Dorokhov A.N., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Information and Space*, 2014, no. 1, pp. 9–12. (in Russ.)
3. Ankudinov G.I. *Sintez struktury slozhnykh ob"yektov: Logiko-kombinatornyy podkhod* (Synthesis of the Structure of Complex Objects: Logical-Combinatorial Approach), Leningrad, 1986, 260 p. (in Russ.)
4. Rakov D.L. *Strukturnyy analiz i sintez novykh tekhnicheskikh sistem na baze morfologicheskogo podkhoda* (Structural Analysis and Synthesis of New Technical Systems Based on the Morphological Approach), Moscow, 2011, 160 p. (in Russ.)
5. Tsvirkun A.D. *Osnovy sinteza struktur slozhnykh sistem* (Fundamentals of the Synthesis of Structures of Complex Systems), Moscow, 1982, 200 p. (in Russ.)
6. Tsygichko V.N., Popovich A.Yu. *Sintez iyerarkhicheskikh sistem upravleniya: Teoriya i praktika* (Synthesis of Hierarchical Control Systems: Theory and Practice), Moscow, 2012, 256 p. (in Russ.)
7. Reznikov B.A. *Metody i algoritmy optimizatsii na diskretnykh modelyakh slozhnykh sistem* (Optimization Methods and Algorithms on Discrete Models of Complex Systems), Leningrad, 1983, 250 p. (in Russ.)
8. Loskutov A.I., Patrakov S.S., Shestopalova O.L. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy (Information and Control Systems)*, 2014, no. 2(69), pp. 18–24. (in Russ.)
9. Balashov E.P. *Evolutsionnyy sintez sistem* (Evolutionary Synthesis of Systems), Moscow, 1985, 328 p. (in Russ.)
10. Murav'yev A.V., Shestopalova O.L. *Prognozirovaniye moral'nogo stareniya informatsionnoy sistemy* (Prediction of the Moral Aging of the Information System), Moscow, 2014, 88 p. (in Russ.)
11. http://iea.gostinfo.ru/files/2014_05/2014_05_13.pdf. (in Russ.)
12. Shestopalova O.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 4(62), pp. 312–319. (in Russ.)
13. <http://www.science-education.ru/113-11078>. (in Russ.)

Data on author

Olga L. Shestopalova — PhD, Associate Professor; Moscow Aviation Institute, „Voskhod“ Branch, Faculty of Aircraft Testing; E-mail: neman2004@mail.ru

For citation: Shestopalova O. L. Objective functions and constraints in the problem of structural synthesis of systems for collecting and processing information on spacecraft technical condition. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 11. P. 958—969 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-958-969