

УДК 004.02:629.76

МЕТОДИКА ВЫБОРА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОТОВНОСТИ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ К ПУСКУ

Вивчарь Р.М., Решетников Д.В., Герасименко С.Ю.

*ФГБВОУ ВО «ВКА имени А.Ф. Можайского» МО РФ, Санкт-Петербург,
e-mail: ramzec9322@rambler.ru*

Одним из показателей, влияющих на оперативность наращивания и восполнения орбитальной группировки космических аппаратов, является вероятность подготовки и пуска ракеты космического назначения за заданное время. В настоящее время значение этой вероятности не соответствует требуемому. На вероятность подготовки и пуска ракеты космического назначения оказывают влияние параметры системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску. Они же влияют на эксплуатационные затраты на процесс подготовки. В свою очередь требованиями руководящих документов определена необходимость минимизации этих эксплуатационных затрат. В публикации представлено описание методики выбора значений параметров системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску, которые позволят обеспечить требуемую вероятность подготовки и пуска ракеты космического назначения за заданное время при минимизации эксплуатационных затрат в условиях различной интенсивности запуска космических аппаратов военного назначения. Представлена структурно-логическая схема методики. Приведено описание ее основных этапов. Поставлены вербальная и формальная постановки задачи выбора оптимальных значений параметров системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску и описаны алгоритмы ее решения на основе метода динамического программирования Р. Беллмана.

Ключевые слова: ракеты космического назначения, система обеспечения готовности, технологическое оборудование, метод динамического программирования

TECHNIQUE OF SELECTION OF PARAMETERS OF A SYSTEM OF REQUISITION REQUIREMENTS FOR SPACE APPLICATION TO START

Vivchar R.M., Reshetnikov D.V., Gerasimenko S.Yu.

Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, e-mail: ramzec9322@rambler.ru

One of the indicators that affects the efficiency of building up and replenishing the orbital group of spacecraft is the probability of preparing and launching a space rocket for a given time. Currently, the value of this probability does not advise the required. The probability of preparation and launch of a space rocket is influenced by the parameters of the system for ensuring the readiness of a space rocket for launch. They also affect the operating costs of the preparation process. In turn, the requirements of the guidance documents determine the need to minimize these operating costs. The probability characterizing the publication presents a description of the methodology choice of parameter values the system of preparedness of a space rocket for launch, which will provide the required probability of the preparation and launch of a space rocket over the specified time while minimizing operating costs under conditions of different intensity of launch of spacecraft for military purposes. The structural and logical scheme of the method is presented. The description of its main stages is given. The verbal and formal formulation of the problem of choosing the optimal values of the parameters of the system for ensuring the readiness of a space rocket for launch and the algorithms for its solution based on the method of dynamic programming by R. Bellman are described.

Keywords: space rocket, system readiness, process equipment, the method of dynamic programming

В период непосредственной угрозы агрессии и в военное время необходимо проведение комплекса мероприятий и действий по наращиванию и восполнению орбитальной группировки космических аппаратов военного назначения в стратегической космической зоне за короткий отрезок времени [1, 2]. Это в свою очередь приводит к резкому увеличению интенсивности запуска космических аппаратов (КА) военного назначения. Показателем, влияющим на оперативность наращивания и восполнения орбитальной группировки КА, является вероятность подготовки и пуска ракеты космического назначения (РКН) за заданное время ($P_{\text{пп}}$).

Анализ отчетов по пускам ракет-носителей «Союз-2» с 1-го Государственного испытательного космодрома Министерства обороны (МО) РФ показал, что в настоящее время имеется несоответствие вероятности подготовки и пуска РКН за заданное время требуемым значениям.

На эту вероятность оказывают влияние различные параметры системы обеспечения готовности (СОГ) РКН к пуску, такие как: количество запасных частей (ЗЧ) элементов замены (ЭЗ) технологического оборудования (ТЛОБ) РКК; времена доставки ЗЧ ЭЗ; уровень обученности личного состава БР, характеризующийся временем устранения отказа $t_{\text{устр}}$; период контроля техническо-

го состояния (ТС) ТлОб. Также стоит отметить, что эти параметры существенным образом влияют и на эксплуатационные затраты процесса подготовки РКН [3]. В свою очередь требованиями различных руководящих документов определена необходимость минимизации эксплуатационных затрат на вооружение и военную технику (ВВТ).

Таким образом вышесказанные обстоятельства свидетельствуют о необходимости наличия научно-методического аппарата, позволяющего выбрать оптимальные значения параметров СОГ, которые обеспечат требуемую $P_{\text{ин}}$ при минимизации эксплуатационных затрат.

Целью данной статьи является представление на основе полученных зависимостей $P_{\text{ин}}$ и эксплуатационных затрат от параметров СОГ [4] разработанной методики выбора таких их значений, которые позволят обеспечить требуемую вероятность подготовки и пуска РКН за заданное время при минимизации эксплуатационных затрат в условиях различной интенсивности запуска КА.

Структурно-логическая схема методики

Для того чтобы описать предложенную в статье методику выбора значений параметров СОГ РКН к пуску при различной интенсивности запусков КА, представим ее в виде структурно-логической схемы (рис. 1), на которой отражены основные ее этапы.

Определение оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску

Постановка задачи

В описанной выше методике наибольший интерес представляет этап 7, на котором происходит выбор оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску. Формально эта задача может быть представлена следующим образом:

$$\bar{w}^* = \arg \min_{\bar{w} \in \Delta} \{C_m(\bar{w})\}, \quad (1)$$

где $\bar{w} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_j, \dots, \bar{w}_j]^T$ – вектор параметров СОГ РКН к пуску; $\bar{w}_j = [\bar{d}_j, \bar{t}_{dj}^{\text{ож}}, \bar{t}_{yj}^{\text{ож}}, \bar{\tau}_j]^T$ – вектор параметров

СОГ ТлОб, участвующего в проведении j -й

ТехОп; $\bar{d}_j = [d_{1mij}, d_{2mij}, \dots, d_{kmij}, \dots, d_{K_{mij}mij}]^T$ – вектор, характеризующий количество ЗЧ k -го ЭЗ m -й СЧ i -го вида ТлОб, участвующего в j -й

ТехОп; $\bar{t}_{dj}^{\text{ож}} = [t_{d1mij}^{\text{ож}}, t_{d2mij}^{\text{ож}}, \dots, t_{dkmij}^{\text{ож}}, \dots, t_{dK_{mij}mij}^{\text{ож}}]^T$ – вектор, характеризующий ожидаемое время доставки ЗЧ k -го ЭЗ m -ой СЧ i -го вида ТлОб, участвующего в j -й

ТехОп; $\bar{t}_{yj}^{\text{ож}} = [t_{y1j}^{\text{ож}}, t_{y2j}^{\text{ож}}, \dots, t_{yij}^{\text{ож}}, \dots, t_{yLj}^{\text{ож}}]^T$ – вектор, характеризующий ожидаемое время устранения отказа БР i -го вида ТлОб, участвующего в j -ой

ТехОп; $\bar{\tau}_j = [\tau_{1j}, \tau_{2j}, \dots, \tau_{ij}, \dots, \tau_{Lj}]^T$ – вектор, характеризующий периодичность контроля ТС i -го вида ТлОб, участвующего в j -й

ТехОп; $\Delta = \left\{ \begin{matrix} d_{kmij}, \tau_{ij} \in Z \\ t_{dkmij}^{\text{ож}}, t_{yij}^{\text{ож}} \in Q \end{matrix} \middle| P_{\text{ин}}(\bar{w}) \geq P_{\text{ин}}^{\text{зад}}, V(\bar{d}) \leq V^{TP} \right\}$ – область допустимых значений параметров СОГ, учитывающая ограничения на $P_{\text{ин}}^{\text{зад}}$ и суммарный объем, отводимый для хранения ЗЧ (V^{TP}).

Для решения представленной оптимизационной задачи был выбран метод динамического программирования [5]. Вместе с тем стоит отметить, решение задачи (1) с требуемой точностью вычислений будет затруднено необходимостью учета ограничения на вероятность подготовки и пуска РКН за заданное время, поэтому для решения этой частной задачи целесообразно, используя метод погружения, поставить более общую задачу (2), которая позволит в процессе однократного ее решения получить множество Парето-оптимальных решений, соответствующих возможным значениям пределов в ограничениях. Формально задача (2) может быть представлена в следующем виде:

Дано:

J, I_j, M_j, K_{mij} – данные о технологическом оборудовании, участвующем в процессе подготовки РКН; λ_{kmij} – интенсивность отказов ЭЗ ТлОб; $P_{\text{ин}}(\bar{w}) = \prod_{j=1}^J P_j(\bar{w}_j)$ – модель оценивания вероятности завершения процесса подготовки и пуска РКН за заданное время;

$$P_j = 1 - \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{k=1}^{K_{mij}} a_{0kmij} (1 - r_{kmij}(d_{kmij})) t_{dkmij}^{\text{ож}} - \sum_{i=1}^{I_j} a_{1ij} t_{yij}^{\text{ож}} - \sum_{i=1}^{I_j} a_{2ij} \tau_{ij} \quad \text{– модель оценивания вероятности завершения } j\text{-й технологической операции за заданное время;}$$

$$C_{TP} = \sum_{j=1}^J C_j(\bar{w}_j) = \sum_{j=1}^J (C_j^{\text{ЗИП}}(\bar{d}_j) + C_j^{\text{ДОС}}(\bar{t}_{dj}^{\text{ож}}) + C_j^{\text{БР}}(\bar{t}_{yj}^{\text{ож}}) + C_j^{\text{КТС}}(\bar{\tau}_j)) \quad \text{– модель ресурсоемкости процесса подготовки и пуска ракеты космического назначения [2].}$$

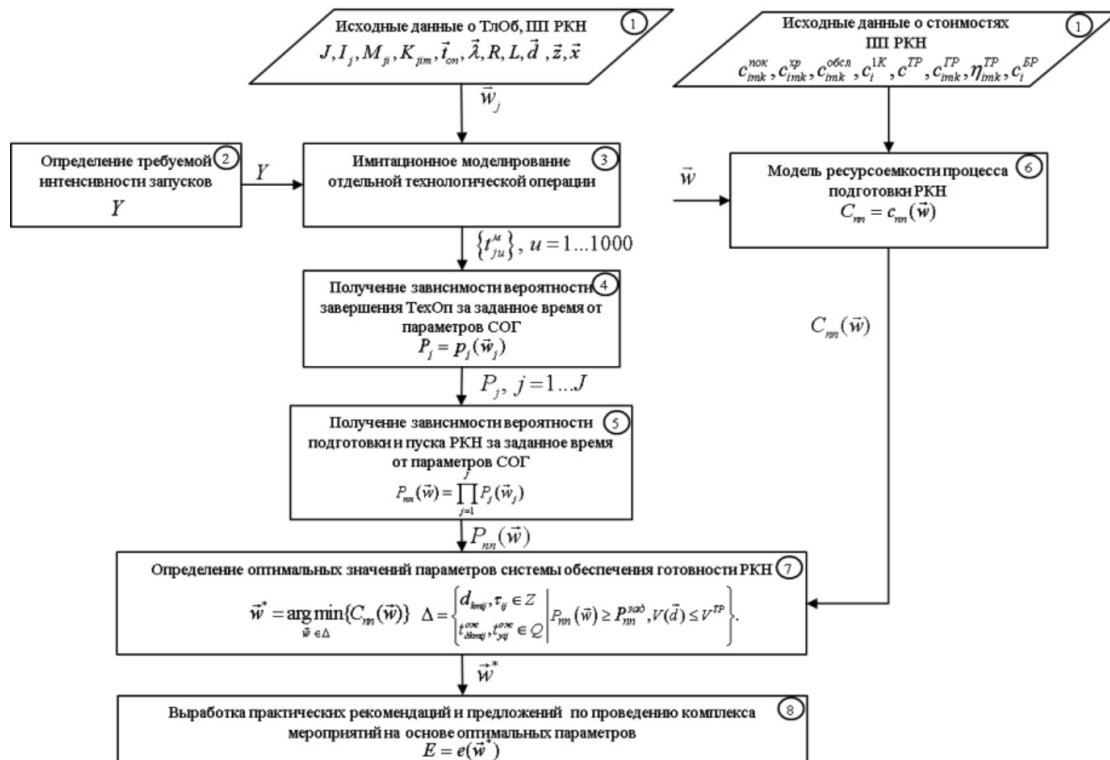


Рис. 1. Структурно-логическая схема методики выбора значений параметров системы обеспечения готовности РКН к пуску

Найти:

$$W^* = \{ \bar{w}_1^*, \bar{w}_2^*, \dots, \bar{w}_p^*, \dots, \bar{w}_p^* \} - \text{множество Парето-оптимальных решений}, \quad (2)$$

где

$$\bar{w}_p^* = \arg \max_{\bar{w}_p \in D} \{ P_{mn}(\bar{w}_p) \}, \quad D = \left\{ \begin{array}{l} \bar{w}_p \mid \xi(\bar{w}) \leq \xi_v = C_{\min} + \nu \Delta C, \nu = 0, \frac{C_{TP} - C_{\min}}{\Delta C} \\ \bar{w}_p \mid \zeta(\bar{w}) \leq \zeta_v = \nu \Delta \zeta, \nu = 0, \frac{V_{TP}}{\Delta \zeta} \end{array} \right\},$$

$\bar{w}_p^* = [\bar{w}_{p1}^*, \bar{w}_{p2}^*, \dots, \bar{w}_{pj}^*, \dots, \bar{w}_{pj}^*]^T, j = \overline{1, J}$ – вектор условно-оптимальных решений, соответствующий паре (ξ_v, ζ_v) ; v_{kmij} – объем, занимаемый ЗЧ k -го элемента замены m -й составной части i -го вида ТлОб, участвующего в j -й ТехОп.

Алгоритм решения задачи определения оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску

Для решения задачи (2) необходимо решить две последовательных задачи: *Задача I* – найти множество Парето-оптимальных решений для каждой операции ТГ; *Задача II* – путем «склейки» ТехОп, используя метод динамического программирования, найти множество Парето-оптимальных решений для всего процесса.

Решение *Задачи I* заключается в выполнении трех сложных в вычислительном плане шагов. Алгоритм первого шага представлен на рис. 2.

В результате выполнения описанного выше алгоритма (рис. 2) для всех значений $\xi_{kmij}^1 = \xi_{kmij}^{1\min}, \xi_{kmij}^{1\min} + \Delta \xi, \dots, C_{TP}$ и $\zeta_{kmij}^1 = 0, \Delta \zeta, \dots, V_{TPj}$ получаем максимальное значение $F_{kmij}^1(\xi_{kmij}^1, \zeta_{kmij}^1)$ и соответствующие ему условно-оптимальные значения количества ЗЧ – d_{kmij}^* и времени их доставки – $t_{dkmij}^{ок*}$.

Далее необходимо перейти к выполнению второго шага, блок-схема алгоритма которого приведена на рис. 3.

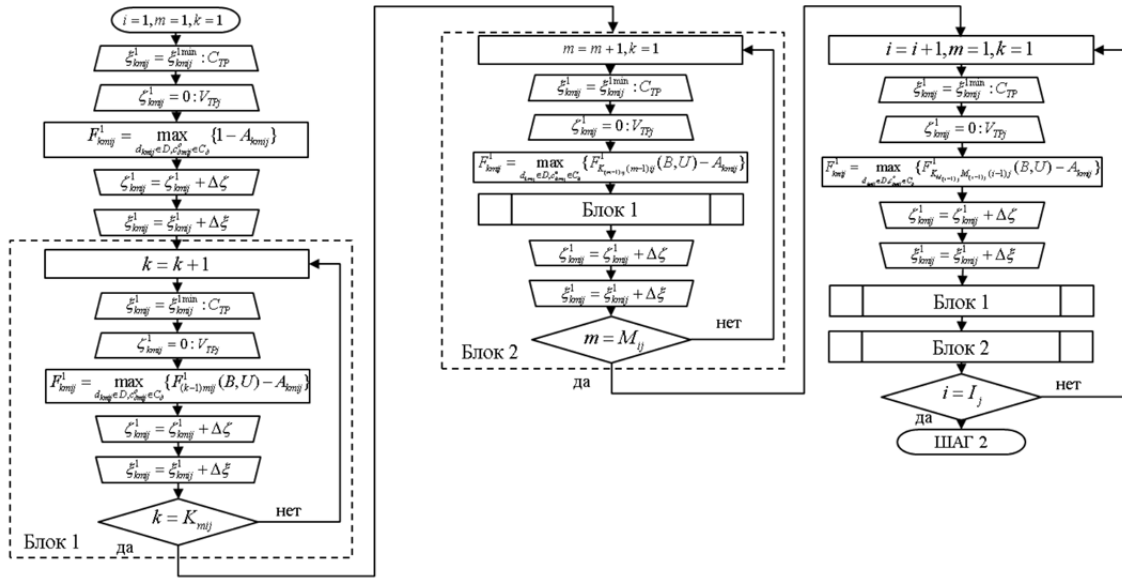


Рис. 2. Блок-схема алгоритма выполнения первого шага нахождения множества Парето-оптимальных решений для j-й TexOn (с учетом количества ЗЧ ЭЗ и времен их доставки, где:

$$F^1_{kmij}(\xi^1_{kmij}, \zeta^1_{kmij}) = F^1_{kmij}; A_{kmij}(\xi^1_{kmij}, \zeta^1_{kmij}) = A_{kmij} = a_{0111j}(1 - r_{111j}(d_{111j}))t_{d111j}^{ок}(c_{d111j}^o);$$

$$\xi^1_{kmij} = c_{kmij}^{пнок} + \min c_{dkmij}^o \mid c_{dkmij}^o \in C_{dkmij} = \left\{ c_{dkmij}^1, \dots, c_{dkmij}^o, \dots, c_{dkmij}^{okmij} \right\}; B = \xi_{kmij} - c(d_{kmij}, t_{dkmij}^{ок});$$

$$U = \zeta_{kmij} - d_{kmij}v_{kmij}; D = \left\{ d_{kmij} \mid 0 \leq d_{kmij} \leq \min \left\{ \left| \frac{\xi^1_{kmij} - \xi_{kmij}^{1min}}{c_{kmij}} \right|, \left| \frac{\zeta^1_{kmij}}{v_{kmij}} \right| \right\} \right\};$$

$$C_d = \{ c_{d111j}^o \mid c_{d111j}^o + c_{111j}^{пнок} \leq \xi_{111j}^1 - c_{111j}d_{111j} \}$$

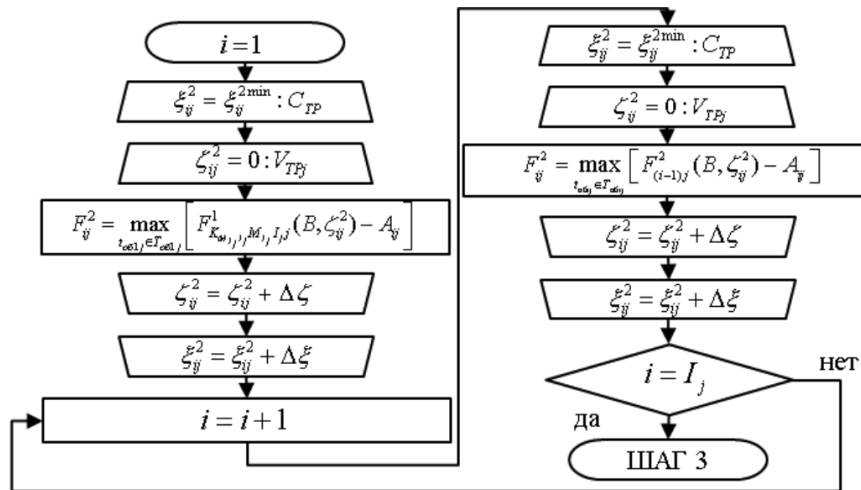


Рис. 3. Блок-схема алгоритма выполнения второго шага нахождения множества Парето-оптимальных решений для j-й TexOn (с учетом времени устранения отказа), где:

$$F^2_{ij}(\xi^2_{ij}, \zeta^2_{ij}) = F^2_{ij}; A_{ij}(\xi^2_{ij}, \zeta^2_{ij}) = A_{ij} = a_{1ij}t_{yij}^{ок}(t_{o6ij}); B = \xi_{ij}^2 - c_{ij}^{BP}t_{o6ij}; T_{o61j} = \left\{ t_{o61j} \mid 0 \leq t_{o61j} \leq \frac{\xi_{1j}^2}{c_{1j}^{BP}} \right\}$$

Результатом выполнения второго шага (рис. 3) является нахождение для всех значений $\xi_{ij}^2 = \xi_{ij}^{2\min}, \xi_{ijTP}^{2\min} + \Delta\xi, \dots, C$ и $\zeta_{ij}^2 = 0, \Delta\zeta, \dots, V_{TPj}$ максимального значения $F_{ij}^2(\xi_{ij}^2, \zeta_{ij}^2)$ и соответствующего ему условно-оптимального значения времени устранения отказа $t_{yij}^{ок*}$.

Заключительным шагом нахождения множества Парето-оптимальных решений для j -ой ТехОп является 3 шаг. Блок-схема алгоритма его выполнения представлена на рис. 4.

В результате выполнения описанного выше алгоритма (рис. 4) для всех значений $\xi_{ij}^3 = \xi_{ij}^{3\min}, \xi_{ij}^{3\min} + \Delta\xi, \dots, C_{TP}$ и $\zeta_{ij}^3 = 0, \Delta\zeta, \dots, V_{TPj}$ получаем максимальное значение $F_{ij}^3(\xi_{ij}^3, \zeta_{ij}^3)$ и соответствующее ему условно-оптимальное значение периодичности контроля τ_{ij}^* .

Решение *Задачи I* J раз позволит получить множество Парето-оптимальных решений для каждой ТехОп технологического графика подготовки РКН к пуску и тем самым перейти к решению *Задачи II* – путем «склейки» ТехОп, используя метод динамического программирования, найти множество Парето-оптимальных решений для всего процесса.

Метод динамического программирования позволяет свести решение этой задачи

с $2(J-1)$ неизвестными к последовательному решению $(J-1)$ задачи с двумя неизвестными. При этом в связи с тем, что при решении каждой такой задачи неизвестно количество располагаемых денежных средств и суммарного объема, выделяемого для хранения ЗЧ, необходимо находить ее решение на первом шаге («склейка» первой и второй ТехОп) для всех возможных значений

$$\xi_1 = \xi_1^{\min}, \xi_1^{\min} + \Delta C, \dots, C_{TP}, \quad (3)$$

где

$$\xi_1^{\min} = \xi_{I_1}^{3\min} + \xi_{I_2}^{3\min}$$

и для всех возможных значений

$$\zeta_1 = 0, \Delta\zeta, 2\Delta\zeta, \dots, V_{TP}, \quad (4)$$

а на втором и последующих шагах для всех возможных значений

$$\xi_{j-1} = \xi_{j-1}^{\min}, \xi_{j-1}^{\min} + \Delta C, \dots, C_{TP}, j = \overline{3, J}, \quad (5)$$

где

$$\xi_{j-1}^{\min} = \xi_{j-2}^{\min} + \xi_{I_j}^{3\min}$$

и для всех возможных значений

$$\zeta_{j-1} = 0, \Delta\zeta, 2\Delta\zeta, \dots, V_{TP}. \quad (6)$$

Для первого шага функциональное уравнение Беллмана имеет вид

$$F_1(\xi_1, \zeta_1) = \max_{\xi_{I_2}^3 \in \Xi, \zeta_{I_2}^3 \in Z} \{ F_{I_2}^3(\xi_{I_2}^3, \zeta_{I_2}^3) F_{I_1}^3((\xi_1 - \xi_{I_2}^3), (\zeta_1 - \zeta_{I_2}^3)) \}, \quad (7)$$

где $\Xi = \{ \xi_{I_2}^3 \mid \xi_{I_2}^3 = \xi_{I_2}^{3\min}, \xi_{I_2}^{3\min} + \Delta\xi, \dots, (\xi_1 - \xi_{I_1}^{3\min}) \}$, $Z = \{ \zeta_{I_2}^3 \mid \zeta_{I_2}^3 = 0, \Delta\zeta, 2\Delta\zeta, \dots, \zeta_1 \}$.

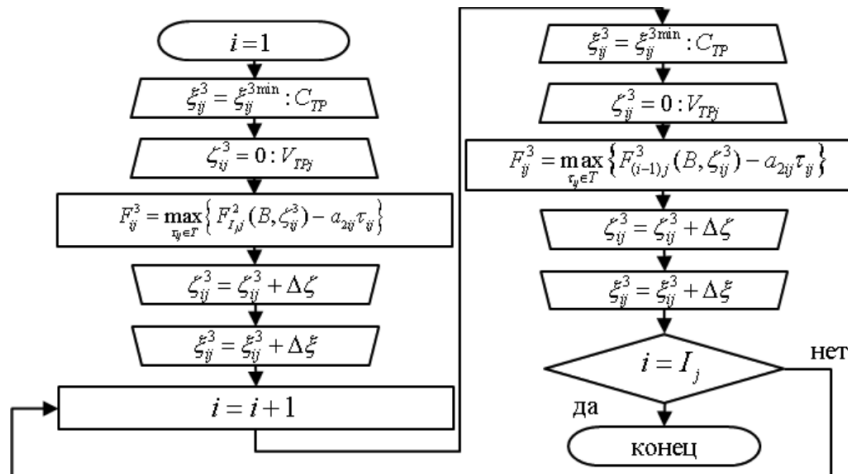


Рис. 4. Блок-схема алгоритма выполнения третьего шага нахождения множества Парето-оптимальных решений для j -ой ТехОп (с учетом периодичности контроля ТС), где:

$$F_{ij}^3(\xi_{ij}^3, \zeta_{ij}^3) = F_{ij}^3; B = \xi_{ij}^3 - \frac{c_{ij}^{1K} 8760}{\tau_{ij}}; T = \left\{ \tau_{ij} \in \{8760, 4380, 2190, 730\} \mid \tau_{ij} \leq \frac{c_{ij}^{1K} 8760}{\xi_{ij}^3} \right\}$$

В результате выполнения этого шага получим для всех значений (3–4) максимальные значения $F_1(\xi_1, \zeta_1)$ и соответствующие им условно-оптимальные значения выделяемых денежных средств на проведение первой и второй ТехОп – $\xi_{I_1}^{3*}, \xi_{I_2}^{3*}$ и суммарных объемов, выделяемых для хранения ЗЧ – $\zeta_{I_1}^{3*}, \zeta_{I_2}^{3*}$.

Для последующих шагов ($j = \overline{3, J}$) уравнение Беллмана принимает следующий вид

$$F_{(j-1)}(\xi_{j-1}, \zeta_{j-1}) = \max_{\xi_{I,j}^3 \in \Xi, \zeta_{I,j}^3 \in Z} \left\{ F_{I,j}^3(\xi_{I,j}^3, \zeta_{I,j}^3) F_{j-2}((\xi_{j-1} - \xi_{I,j}^3), (\zeta_{j-1} - \zeta_{I,j}^3)) \right\}, \quad (8)$$

$$\text{где } \Xi = \left\{ \xi_{I,j}^3 \mid \xi_{I,j}^3 = \xi_{I,j}^{3\min}, \xi_{I,j}^{3\min} + \Delta\xi, \dots, (\xi_{j-1} - \xi_{j-2}^{\min}) \right\}, \quad Z = \left\{ \zeta_{I,j}^3 \mid \zeta_{I,j}^3 = 0, \Delta\zeta, 2\Delta\zeta, \dots, \zeta_{j-1} \right\}.$$

Результатом каждого шага является нахождение для всех значений (5–6) максимальных значений $F_{(j-1)}(\xi_{j-1}, \zeta_{j-1})$ и соответствующих им условно-оптимальных значений выделяемых денежных средств на j -ю ТехОп – $\xi_{I,j}^{3*}$ и суммарных объемов, выделяемых для хранения ЗЧ – $\zeta_{I,j}^{3*}$.

Выполнив все шаги, получаем множество Парето-оптимальных решений для процесса подготовки РКН в целом.

Далее для решения обозначенной выше задачи (1) необходимо на последнем шаге выбрать условно-оптимальное значение $F_{(J-1)}(\xi_{J-1}, \zeta_{J-1}) \geq P_{\text{пл}}^{\text{зад}}$ при условии что соответствующее ему $\zeta_{J-1} \leq V^{TP}$, и, выполнив операции обратного хода, найти $\left\{ \xi_{I,J}^{3*}, \zeta_{I,J}^{3*} \right\}, \left\{ \xi_{I_{j-1},j-1}^{3*}, \zeta_{I_{j-1},j-1}^{3*} \right\}, \dots, \left\{ \xi_{I_1}^{3*}, \zeta_{I_1}^{3*} \right\}$.

Затем для каждой пары $\left\{ \xi_{I,j}^{3*}, \zeta_{I,j}^{3*} \right\}$, используя результаты решения задачи нахождения множества Парето-оптимальных решений для j -й ТехОп, также, выполнив операции обратного хода, найдем для нее вектор оптимальных значений параметров $\vec{w}_j^* = \left[\vec{d}_j^*, \vec{t}_{ij}^{\text{ож}*}, \vec{t}_{ij}^{\text{ож}*}, \vec{\tau}_j^* \right]^T$ и в итоге вектор оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску – \vec{w}^* .

Далее на основе полученного \vec{w}^* будет возможна выработка практических рекомендаций и предложений по проведению комплекса мероприятий, направленного на обеспечение требуемой вероятности подготовки и пуска РКН за заданное время.

Заключение

В статье была описана методика выбора значений параметров системы обеспечения готовности РКН к пуску. Приведена структурно-логическая схема методики. Представлен алгоритм решения задачи опреде-

ления оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску, на основе последовательного применения метода динамического программирования, на первом этапе которого удастся получить множество Парето-оптимальных решений для каждой ТехОп технологического графика подготовки, а на втором – используя полученные решения, найти множество Парето-оптимальных решений для всего процесса подготовки РКН в целом.

Представленная методика выбора значений параметров системы обеспечения готовности РКН к пуску отличается от известных учетом различной интенсивности запуска КА военного назначения путем получения соответствующих значений коэффициентов регрессии модели оценивания вероятности завершения ТехОп за заданное время и позволяет выработать практические рекомендации и предложения по проведению комплекса мероприятий на основе полученного вектора оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску.

Список литературы

1. Данелян А.П. К вопросу создания системы средств выведения для оперативного наращивания (восполнения) орбитальной группировки космических аппаратов // Оперативное искусство и тактика космических войск ВКС: сборник трудов ВКА имени А.Ф. Можайского. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. С. 34–40.
2. Савиных В.П. Космическая сфера военных действий // Образовательные ресурсы и технологии. 2015 № 3 (11). С. 96–103.
3. Вихров Н.М. Управление и принятие решений в производственно-технологических системах. СПб.: Политехника, 2013. 481 с.
4. Вивчарь Р.М., Пачин А.В., Решетников Д.В., Поляков С.А. Модель ресурсоемкости процесса подготовки и пуска РКН // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 7. С. 15–19.
5. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 460 с.