

УДК 629.7.084:004

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ И ПОПОЛНЕНИЯ КОМПЛЕКТА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ДОСТУПНОСТИ ПОКУПНЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ

Богдан А.Н., Поляков А.П., Чернобаев А.Ю.

*ФГКВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург,
e-mail: vka@mil.ru*

Настоящая статья посвящена описанию методики формирования и пополнения комплекта запасных частей технологического оборудования ракетно-космических комплексов с учетом доступности покупных комплектующих изделий. В основе методики лежит алгоритм Беллмана метода динамического программирования. Данный подход обладает рядом достоинств, основными из которых являются интуитивная простота и наглядность применения. Методика позволяет синтезировать систему обеспечения запасами изделия военной техники, обеспечивающую выполнение требований к коэффициенту готовности изделия при минимальных затратах с учетом доступности покупных комплектующих изделий. Для решения оптимизационной задачи анализируются известные модели обоснования требований к системам обеспечения запасами, в которых предлагаются методы расчета их оптимальной структуры, номенклатуры и количества запасных частей, а также периодичность пополнения конкретной номенклатуры запасных частей, существенно влияющая на стоимость их доставки, хранения и обслуживания. Разработанная методика, в отличие от известных, реализуется за счет одновременного формирования комплекта запасных частей и стратегий его пополнения с учетом доступности покупных комплектующих изделий. В статье приводится пример применения методики для синтеза оптимальной системы обеспечения запасами системы 14И277.

Ключевые слова: система обеспечения запасами, коэффициент готовности, покупное комплектующее изделие, надежность, запасная часть

THE METHOD OF FORMATION AND REPLENISHMENT OF SPARE PARTS AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF SPACE-ROCKET COMPLEXES BASED ON THE AVAILABILITY OF PURCHASED COMPONENTS

Bogdan A.N., Polyakov A.P., Chernobaev A.Yu.

*Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education Mozhaisky Military Space Academy,
Saint-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru*

This article is devoted to the description of the method of formation and replenishment of a set of spare parts of technological equipment of rocket and space systems, taking into account the availability of purchased components. The method is based on Bellman's algorithm of dynamic programming method. This approach has a number of advantages, the main of which are intuitive simplicity and clarity of application. The technique allows to synthesize the system of provision with stocks of military equipment products, ensuring compliance with the requirements for the coefficient of readiness of the product at minimum cost, taking into account the availability of purchased components. To solve the optimization problem, we analyze the known models of substantiation of requirements for inventory systems, which offer methods for calculating their optimal structure, nomenclature and number of spare parts, as well as the frequency of replenishment of a specific nomenclature of spare parts, which significantly affects the cost of their delivery, storage and maintenance. The developed method, unlike the known ones, is realized due to the simultaneous formation of a set of spare parts and strategies for its replenishment, taking into account the availability of purchased components. The article provides an example of application of the method for the synthesis of the optimal system of inventory system 14I277.

Keywords: the supply system inventory, availability, purchase component product, reliability, spare part

Сегодня в научных исследованиях, посвященных созданию и эксплуатации сложных технических систем (СТС), существенное развитие получил подход повышения эффективности их функционирования путем снижения стоимости жизненного цикла (ЖЦ). Управление стоимостью ЖЦ СТС позволяет получить превосходство перед конкурентами за счет оптимизации затрат на приобретение и владение продукцией. Указанная концепция считается актуальной и для ракетно-космической техники. Так, в Федеральной космической программе РФ

на 2016–2025 гг. в качестве одной из приоритетных задач постулируется задача повышения конкурентоспособности существующих и перспективных средств выведения.

Существенный вклад в стоимость услуг по выведению на орбиту полезных грузов вносят затраты на обеспечение готовности технологического оборудования (ТлОб) ракетно-космических комплексов (РКК) к целевому применению. Эти затраты включают затраты на закупку комплектов запасных частей (ЗЧ), их доставку, хранение и обслуживание. Вопросу обоснования требований

к системам обеспечения запасами (СОЗ) посвящено множество работ [1–3], в которых предлагаются методы расчета оптимальной структуры СОЗ, номенклатуры и количества элементов ЗЧ. При этом периодичность (стратегия) пополнения конкретной номенклатуры ЗЧ, существенно влияющая на стоимость их доставки, хранения и обслуживания, либо считается заданной, либо остается за рамками исследований.

В течение последних лет для производства образцов ракетно-космической техники (РКТ) используются десятки покупных комплектующих изделий (ПКИ), включая современные и надежные комплектующие иностранного производства, аналогов которых в России не производится. ПКИ – это изделие, не изготавливаемое на данном предприятии, а получаемое (приобретаемое) им и используемое в производимом изделии в готовом виде как его составная часть (СЧ). ПКИ по признаку доступности делятся на устаревающие и не устаревающие. Устаревающие ПКИ характеризуются снижающейся со временем их доступностью. Действующие методики оценки и расчета запасов в комплектах ЗЧ рассматривают в качестве источника пополнения неотказывающий источник пополнения [4, 5]. Данное ограничение не учитывает доступность устаревающих ПКИ, что приведет к дополнительным материальным затратам для обеспечения требуемого коэффициента готовности образца РКТ в процессе его длительной эксплуатации. Например, в состав системы 14И277 входит до 30% покупных комплектующих иностранного производства. Это предъявляет дополнительные требования к формированию как номенклатуры комплекта ЗЧ, так и стратегий его пополнения для обеспечения требуемого уровня готовности комплекта в период его длительной эксплуатации.

Цель исследования: разработка научно-методического аппарата, позволяющего сформировать оптимальное сочетание стратегий пополнения комплектов ЗЧ ТлОб РКК, обеспечивающее снижение эксплуатационных затрат при выполнении требований к коэффициенту готовности оборудования, с учётом доступности устаревающих ПКИ.

Методика формирования стратегий пополнения комплектов ЗЧ ТлОб РКК с учетом устаревающих ПКИ включает следующие этапы:

- определение перечня устаревающих ПКИ в составе комплекта ЗЧ ТлОб РКК и сроков их доступности;
- определение частного коэффициента готовности комплекта ЗЧ, позволяющего

обеспечить требуемое значение коэффициента готовности оборудования;

- определение оптимального количественного состава комплекта ЗЧ и стратегий его пополнения для каждого периода постоянства их доступности.

Методика определения перечня устаревающих ПКИ в составе комплекта ЗЧ ТлОб РКК и сроков их доступности

Для определения перечня устаревающих ПКИ в составе комплекта ЗЧ ТлОб РКК и сроков их доступности предполагается использовать методику, приведенную в [6]. Методика включает два этапа:

1 этап: используя показатели признака производства, периода производства и устаревания ЗЧ, определяем в составе комплекта ЗИП устаревающие ПКИ;

2 этап: определение периода доступности ЗЧ, отнесенным к устаревающим ПКИ, путем получения оценки их недоступности по годам на весь период назначенного срока службы оборудования. Сроком окончания доступности будет год, для которого значение недоступности ПКИ превысит значение, определенное лицом, принимающим решение, как критичное.

Определение частного коэффициента готовности комплекта ЗЧ, позволяющего обеспечить требуемое значение коэффициента готовности оборудования

Определяем частный коэффициент готовности для элементов оборудования, не вошедших в комплект ЗИП, используя выражение

$$K_{Г}^{\text{ЗИП}} = \prod_{h'=1}^{|H'|} K_{Г_{h'}}, \quad (1)$$

где H' – множество номенклатур составных частей оборудования, не вошедших в состав комплекта ЗИП.

Для определения значений частных коэффициентов готовности для элементов оборудования, не вошедших в комплект ЗИП, воспользуемся моделями, приведенными в [7].

Определяем требуемое значение частного коэффициента готовности для комплекта ЗЧ, обеспечивающего коэффициент готовности ТлОб, используя выражение

$$K_{Г_{\text{треб}}}^{\text{ЗИП}} = \frac{K_{Г}}{K_{Г}^{\text{ЗИП}}}. \quad (2)$$

Определение оптимального количественного состава комплекта ЗЧ ТлОб РКК и стратегий его пополнения

Целью формирования оптимального количественного состава комплекта ЗЧ

и стратегий его пополнения является минимизация затрат на обеспечение ЗЧ ТлОб при выполнении требований к коэффициенту готовности оборудования.

Для определения оптимального количественного состава комплекта ЗЧ и стратегий его пополнения разработан алгоритм определения количественного состава комплекта ЗЧ и стратегий его пополнения. Определение оптимального количествен-

ного состава комплекта ЗЧ и стратегий его пополнения производится для каждого периода постоянства доступности ЗЧ, относящихся к ПКИ. Алгоритм разработан на основе метода динамического программирования, в основу которого положен метод Беллмана.

Описание алгоритма.

Прямой ход алгоритма:

Уравнение Беллмана для первого шага:

$$K_{r1}^{зип}(\epsilon) = \max_{\substack{m_1 \in \Delta \\ s_1 \in \Delta}} K_{r1}^{зип}(m_1, s_1); \epsilon = 0, \Delta c, 2\Delta c, \dots, C_{задан}^{\Sigma} \Rightarrow \{\hat{m}_1(\epsilon), \hat{s}_1(\epsilon)\}. \quad (3)$$

Для последующих шагов:

$$K_h^{зип}(\epsilon) = \max_{\substack{m_h \in \Delta \\ s_h \in \Delta}} (K_{rh}^{зип}(m_h, s_h) * K_{h-1}^{зип}(\epsilon - C_h^{\Sigma})) \Rightarrow \{\hat{m}_h(\epsilon), \hat{s}_h(\epsilon)\}. \quad (4)$$

Обратный ход алгоритма:

$$\dot{m}_{|H|-\alpha}; \dot{s}_{|H|-\alpha} = \hat{m}_{|H|-\alpha}; \hat{s}_{|H|-\alpha} * (C_{задан}^{\Sigma} - \sum_{\phi=0}^{\alpha-1} C_{|H|-\phi}^{\Sigma}(\dot{m}_{|H|-\phi}; \dot{s}_{|H|-\phi})), \alpha = \overline{1, |H|-1}. \quad (5)$$

В формулах (3)–(5) обозначены:

m_h – количество ЗЧ h -й номенклатуры;

s_h – стратегия пополнения ЗЧ h -й номенклатуры;

C_h^{Σ} – затраты на обеспечение ЗЧ h -й номенклатуры;

ϵ – величина затрат на обеспечение ЗЧ;

Δc – шаг увеличения затрат на обеспечение ЗЧ.

Применение метода динамического программирования позволяет получить множество Парето-оптимальных решений в плоскости «коэффициент готовности – стоимость». Множество стратегий пополнения комплекта ЗЧ определяется следующими вариантами:

S_1 – поставка ЗЧ на весь срок службы;

S_2 – периодическое пополнение ЗЧ с периодом равным одному году;

S_3 – периодическое пополнение ЗЧ с периодом равным $1/\lambda$ (λ – интенсивность отказов, $1/ч.$).

Варианты применяемых стратегий пополнения определяются доступностью ЗЧ на периоде постоянства доступности ЗЧ:

$$S = \begin{cases} 1 \div 3, & \text{при } t_h^d \geq \sum_{k=1}^{\gamma} \tau_k; \\ 1, & \text{при } t_h^d < \sum_{k=1}^{\gamma} \tau_k, \end{cases} \quad (6)$$

где t_h^d – период постоянства доступности h -й запасной части.

Результатом решения является совокупность комплектов ЗЧ и стратегий их пополнения, полученных для каждого периода постоянства доступности ЗЧ, обеспе-

чивающих требуемый коэффициент готовности ТлОб РКК с учетом минимальных эксплуатационных затрат на обеспечение ЗЧ. А суммарные эксплуатационные затраты на обеспечение ЗЧ будут получены путем сложения затрат на каждом периоде постоянства доступности ЗЧ.

Пример применения методики

Рассмотрим применение методики для выбора оптимального комплекта ЗЧ и стратегий его пополнения системы 14И277, обеспечивающих значение коэффициента готовности системы не ниже 0,99 в течение 12 лет эксплуатации.

Пусть поток отказов простейший, параметр потока отказов примем равным интенсивности отказов, аналогично примем параметры потока и как величины обратно пропорциональные математическим ожиданиям длительностей соответствующих процессов.

Выполнив расчеты для определения перечня устаревающих ПКИ и сроков их доступности, используя методику, приведенную в [6], получаем следующие данные для общей оценки недоступности ЗЧ, равной 0,3:

- монитор АРМ NEOVO-19А – 12 лет;
- коммутатор сетевой CSNH-800X – 12 лет;
- плата PSI-429 – 7 лет;
- плата CPC-502 – 10 лет.

Из этого следует, что периоды постоянства доступности ЗЧ будут иметь следующие значения: $\tau_1 = 7$ лет, $\tau_2 = 3$ года, $\tau_3 = 2$ года.

Следующим этапом расчетов является определение требуемого коэффициента готовности для комплекта ЗЧ. Учитывая,

что отказ любой составной части системы приводит к отказу всей системы, его коэффициент готовности будем определять, как произведение частных коэффициентов готовности входящих в неё составных частей.

Подставив в формулу (1) значения частных коэффициентов готовности составных частей системы, не вошедших в состав комплекта ЗЧ, получим значение 0,9981.

Подставив в выражение (2) имеющиеся значения заданного коэффициента готовности системы и коэффициент готовности составных частей системы, не вошедших в состав комплекта ЗЧ, получим значение 0,9919. Данное число является требуемым значением коэффициента готовности комплекта ЗЧ для каждого периода постоянства доступности ЗЧ.

Для получения оптимального количественного состава ЗЧ и стратегий его пополнения для каждого периода постоянства доступности ЗЧ, воспользуемся алгоритмом определения количественного состава комплекта ЗЧ и стратегий его пополнения.

Перед применением алгоритма определим возможные стратегии пополнения для каждой номенклатуры ЗЧ на каждом периоде постоянства доступности ЗЧ. Перечень номенклатур ЗЧ и возможные стратегии их пополнения приведен в табл. 1.

Применение алгоритма позволило получить количественный состав ЗЧ и стратегии его пополнения для каждого периода постоянства доступности ЗЧ (табл. 2–4) с учетом минимальных затрат и коэффициента готовности комплекта ЗИП не менее 0,9919.

Таблица 1

Возможные стратегии пополнения ЗЧ на периодах постоянства доступности ЗЧ

№ п/п	Наименование ЗЧ	τ_1	τ_2	τ_3
1	Блок МВ 24/5	1–3	1–3	1–3
2	Блок МВ 24/12	1–3	1–3	1–3
3	Плата PSI-429	1–3	1	1
4	Плата СРС-502	1–3	1–3	1
5	Монитор АРМ NEOVO-19А	1–3	1–3	1–3
6	Блок РП	1–3	1–3	1–3
7	Блок ОВИ	1–3	1–3	1–3
8	Коммутатор сетевой CSNH-800X	1–3	1–3	1–3
9	Блок ППД	1–3	1–3	1–3

Таблица 2

Количественный состав ЗЧ и стратегии его пополнения для τ_1

№ п/п	Наименование ЗЧ	Кол-во/ стратегия пополнения
1	Блок МВ 24/5	14/2
2	Блок МВ 24/12	21/2
3	Плата PSI-429	13/3
4	Плата СРС-502	5/3
5	Монитор АРМ NEOVO-19А	3/3
6	Блок РП	3/3
7	Блок ОВИ	25/3
8	Коммутатор сетевой CSNH-800X	24/3
9	Блок ППД	8/3

Затраты на обеспечение ЗЧ составят 3706 ден. ед.

Таблица 3

Количественный состав ЗЧ и стратегии его пополнения для τ_2

№ п/п	Наименование ЗЧ	Кол-во/ стратегия пополнения
1	Блок МВ 24/5	9/1
2	Блок МВ 24/12	10/1
3	Плата PSI-429	7/1
4	Плата СРС-502	3/3
5	Монитор АРМ NEOVO-19А	1/3
6	Блок РП	3/3
7	Блок ОВИ	14/3
8	Коммутатор сетевой CSNH-800X	12/3
9	Блок ППД	4/1

Затраты на обеспечение ЗЧ составят 1971 ден. ед.

Таблица 4

Количественный состав ЗЧ и стратегии его пополнения для τ_3

№ п/п	Наименование ЗЧ	Кол-во/ стратегия пополнения
1	Блок МВ 24/5	8/1
2	Блок МВ 24/12	8/1
3	Плата PSI-429	5/1
4	Плата СРС-502	2/1
5	Монитор АРМ NEOVO-19А	1/3
6	Блок РП	1/3
7	Блок ОВИ	11/1
8	Коммутатор сетевой CSNH-800X	9/3
9	Блок ППД	3/3

Затраты на обеспечение ЗЧ составят 1459 ден. ед.

Суммарные минимальные эксплуатационные затраты на обеспечение ЗЧ при выполнении требований к готовности системы 14И277 составят 7136 ден. ед.

Результаты исследования и их обсуждение

Результатом проведенного исследования является разработка методики формирования и пополнения комплекта ЗЧ ТлОб РКК с учетом доступности ПКИ, обеспечивающей снижение эксплуатационных затрат при выполнении требований к коэффициенту готовности оборудования, с учетом доступности устаревающих ПКИ. Данная методика обсуждалась в ходе двух научно-практических конференций.

Заключение

Представленная в статье методика позволяет решать задачу синтеза системы обеспечения запасами, обеспечивающей требуемую готовность оборудования при наименьшей величине эксплуатационных затрат на обеспечение ЗЧ с учетом их доступности. В основе методики лежит алгоритм Беллмана метода динамического про-

граммирования. Методика отличается от известных тем, что позволяет учесть снижающуюся со временем доступность ЗЧ.

Список литературы

1. Дьяков А.Н., Жеребцов Е.А., Кокарев А.С., Решетников Д.В. Алгоритмы оперативного обоснования оптимальных планов доставки комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2017. № 658. С. 130–138.
2. Шура-Бура А.Э., Топольский М.В. Методы организации, расчета и оптимизации комплектов запасных элементов сложных технических систем. М.: Знание, 1981. 540 с.
3. Кокарев А.С., Марченко М.А., Пачин А.В. Разработка комплексной программы повышения ремонтпригодности сложных технических комплексов // Фундаментальные исследования. 2016. № 4. С. 501–505.
4. ГОСТ 27.507 – 2015 Запасные части, инструмент и принадлежности. Оценка и расчет запасов. М.: Стандартинформ, 2015. 48 с.
5. Методика оценки состава и достаточности ЗИП и расходных материалов КРК 14К330. Утверждена Ген. конструктором КБ «Салют», 2014. 46 с.
6. Богдан А.Н., Кокарев А.С. Подходы к определению перечня устаревающих ПКИ и сроков их доступности // Актуальные проблемы Российской космонавтики: сборник тезисов XLII академических чтений по космонавтике. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2018. С. 170–171.
7. Богдан А.Н., Бояршинов С.Н., Клепов А.В., Поляков А.П. Модель обеспечения готовности технологического оборудования РКК // Фундаментальные исследования. 2017. № 11. С. 272–277.