

УДК 629.7.084

МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Богдан А.Н., Бояршинов С.Н., Клепов А.В., Поляков А.П.

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

Настоящая статья посвящена описанию модели обеспечения готовности технологического оборудования ракетно-космических комплексов к целевому применению с учетом стоимости выбранной стратегии пополнения ЗИП. Обосновывается задача определения совокупности оптимальных стратегий пополнения элементов ЗИП каждой номенклатуры по критерию «готовность – стоимость» с учетом параметров безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости. Для решения оптимизационной задачи анализируются известные модели обоснования требований к системам обеспечения запасами, которые основаны на методах расчета их оптимальной структуры, номенклатуры и количества элементов ЗИП, а также периодичность пополнения конкретной номенклатуры ЗИП. Предлагаемая модель позволяет определять величину затрат на реализацию стратегии пополнения элементов ЗИП одной номенклатуры в течение назначенного срока службы оборудования на основе использования критерия «готовность – стоимость» и учитывает параметры безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости этого оборудования. В статье приводится пример применения моделей для выбора оптимальных стратегий пополнения комплекта ЗИП агрегата заправки.

Ключевые слова: модель обеспечения готовности, ресурсоемкость эксплуатационных процессов, системы обеспечения запасами, коэффициент готовности

THE MODEL OF PREPAREDNESS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF ROCKET AND SPACE COMPLEX

Bogdan A.N., Boyarshinov S.N., Klepov A.V., Polyakov A.P.

*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 model for ensuring the readiness of the technological equipment of rocket and space complexes to the target application, taking into account the value of the chosen strategy of replenishment of spare parts. The problem of determining the set of optimal strategies for replenishing the elements of the spare parts inventory of each nomenclature based on the «readiness-cost» criterion is made with regard to the parameters of non-failure, maintainability and maintainability. To solve the optimization problem, known models of justification of the requirements for supply systems are analyzed, which propose methods for calculating of their optimal structure, the nomenclature and the number of SPTA items, as well as the frequency of replenishment of a specific range of spare parts, which significantly affects the cost of delivery, storage and servicing Spare parts. On the basis of the presented model, it is possible to determine the amount of costs for the implementation of the strategy of replenishing the elements of the spare parts inventory of one nomenclature during the prescribed service life of the equipment. The article gives an example of the application of models for the selection of optimal strategies for replenishment of the spare parts kit of the filling station.

Keywords: availability model, resource intensity of operational processes, inventory management systems, availability ratio

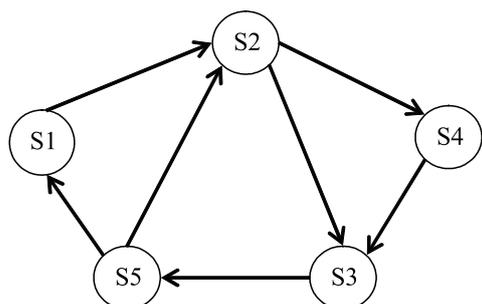
В течение последних лет в научных исследованиях, посвященных созданию и эксплуатации сложных технических систем (СТС), значительное развитие получил подход повышения эффективности их функционирования за счет снижения стоимости жизненного цикла (ЖЦ) этих систем. Управление стоимостью ЖЦ СТС позволяет получить превосходство перед конкурентами за счет оптимизации затрат на приобретение и владение продукцией.

Указанная концепция актуальна 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 нагрузок

вносят затраты на обеспечение готовности технологического оборудования (ТлОб) ракетно-космических комплексов (РКК) к целевому применению. Эти затраты включают затраты на закупку комплектов ЗИП (запасные части, инструменты и принадлежности), их доставку, хранение и обслуживание.

Вопросу обоснования требований к системам обеспечения запасами (СОЗ) посвящено множество работ таких авторов, как А.Э. Шура-Бура, В.П. Грабовецкий, Г.Н. Черкесов, в которых предлагаются методы расчета оптимальной структуры СОЗ, номенклатуры и количества элементов ЗИП. При этом периодичность (стратегия) пополнения конкретной номенклатуры ЗИП, существенно влияющая на стоимость доставки, хранения и обслуживания ЗИП, либо считается заданной, либо остается за рамками исследований.



- S1 – работоспособное состояние ТлОб;
- S2 – состояние отказа, выявление причины отказа;
- S3 – ремонт, замена элемента ЗИП;
- S4 – ожидание поставки элемента ЗИП при отсутствии на объекте эксплуатации;
- S5 – контроль технического состояния после ремонта.

Рис. 1. Граф модели обеспечения готовности

Таблица 1

Законы переходов от *i*-го к *j*-му состоянию графа

<i>i \ j</i>	S1	S2	S3	S4	S5
S1		$1 - e^{-\omega_1 t}$			
S2			$\begin{cases} 0, & \text{при } t < T_d \\ 1, & \text{при } t \geq T_d \end{cases}$ $P_{23} = P_{\text{ДостЗИП}}$	$\begin{cases} 0, & \text{при } t < T_d \\ 1, & \text{при } t \geq T_d \end{cases}$ $P_{24} = 1 - P_{\text{ДостЗИП}}$	
S3					$1 - (1 + \omega_3 t) e^{-\omega_3 t}$
S4			$\begin{cases} 0, & \text{при } t < T_{\text{Пост}} \\ 1, & \text{при } t \geq T_{\text{Пост}} \end{cases}$		
S5	$\begin{cases} 0, & \text{при } t < T_{\text{Кре}} \\ 1, & \text{при } t \geq T_{\text{Кре}} \end{cases}$	$1 - e^{-\omega_5 t}$			

Цель исследования

В этой связи задача разработки модели обеспечения готовности ТлОб РКК к целевому применению, с учетом стоимости выбранной стратегии пополнения ЗИП, становится особенно актуальной.

Материалы и методы исследования

Для определения коэффициента готовности ТлОб РКК воспользуемся следующим выражением:

$$K_r = \prod_{h=1}^N K_{r_h}, \quad (1)$$

где K_{r_h} – коэффициент готовности *h*-го элемента, зависящий от показателей безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости;
N – число элементов.

Опишем зависимость коэффициента готовности оборудования от показателей безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости *h*-го элемента оборудования графовой моделью реализуемых на этом оборудовании эксплуатационных процессов.

Сделаем допущение, что оборудование может находиться одновременно только в одном состоянии $i = 1, 2, \dots, n$ из множества возможных *E*. Поток изменения состояний простейший. В начальный момент времени $t = 0$ оборудование находится в работоспо-

собном состоянии S1. Через случайное время τ_1 оборудование мгновенно переходит в новое состояние $j \in E$ с вероятностью $p_{ij} \geq 0$, причем $\sum_{j \in E} p_{ij} \leq 1$ для

любого $i \in E$. В состоянии *j* оборудование пребывает случайное время, прежде чем переходит в следующее состояние. В этом случае законы переходов от *i*-го к *j*-му состоянию графа могут быть представлены в следующем виде (табл. 1).

Для построения аналитической зависимости используются следующие частные показатели системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР):

- ω_1 – интенсивность отказа элемента;
- ω_3 – параметр потока восстановления отказов (параметр Эрланга);
- ω_5 – параметр потока отказов, выявляемых при контроле технического состояния ТлОб после установки элементов ЗИП (обусловлен математическим ожиданием срока сохраняемости элемента ЗИП);
- $T_{\text{Пост}}$ – длительность ожидания поставки элемента ЗИП, отсутствующего на объекте эксплуатации;
- T_d – длительность диагностирования, выявления причины отказа, поиска отказавшего элемента;
- $T_{\text{Кре}}$ – длительность контроля технического состояния после замены элемента ЗИП;
- n* – количество элементов ЗИП одной номенклатуры в составе ТлОб;
- m* – количество элементов одной номенклатуры в составе ЗИП.

Таблица 2

Зависимости, описывающие свойства графовой модели

Переходы $i-j$	$Q_{ij}(t)$	P_{ij}	$F_i(t)$	\bar{t}_i
S1-S2	$Q_{12} = 1 - e^{-\omega_1 t}$	$p_{12} = 1$	$F_1(t) = 1 - e^{-\omega_1 t}$	$\bar{t}_1 = \frac{1}{\omega_1}$
S2-S3	$Q_{23} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < T_d \\ 1, & \text{при } t \geq T_d \end{cases}$	$p_{23} = e^{-n\lambda_1 T_d} \sum_{k=0}^m \frac{(n\lambda_1 T_d)^k}{k!}$	$F_2(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < T_d \\ 1, & \text{при } t \geq T_d \end{cases}$	$\bar{t}_2 = T_d$
S2-S4	$Q_{24} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < T_d \\ 1, & \text{при } t \geq T_d \end{cases}$	$p_{24} = 1 - e^{-n\lambda_1 T_d} \sum_{k=0}^m \frac{(n\lambda_1 T_d)^k}{k!}$		
S3-S5	$Q_{35} = 1 - (1 + \omega_3 t) e^{-\omega_3 t}$	$p_{35} = 1$	$F_3(t) = 1 - (1 + \omega_3 t) e^{-\omega_3 t}$	$\bar{t}_3 = \frac{2}{\omega_3}$
S4-S3	$Q_{43} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < T_{\text{Пост}} \\ 1, & \text{при } t \geq T_{\text{Пост}} \end{cases}$	$p_{43} = 1$	$F_4(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < T_{\text{Пост}} \\ 1, & \text{при } t \geq T_{\text{Пост}} \end{cases}$	$\bar{t}_4 = T_{\text{Пост}}$
S5-S1	$Q_{51} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < T_{\text{Крит}} \\ 1, & \text{при } t \geq T_{\text{Крит}} \end{cases}$	$p_{51} = e^{-\omega_5 T_{\text{Крит}}}$	$F_5(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\omega_5 t}, & \text{при } t < T_{\text{Крит}} \\ 1, & \text{при } t \geq T_{\text{Крит}} \end{cases}$	$\bar{t}_5 = \frac{1}{\omega_5} - \frac{1}{\omega_5} e^{-\omega_5 T_{\text{Крит}}}$
S5-S2	$Q_{52} = 1 - e^{-\omega_5 t}$	$p_{52} = 1 - e^{-\omega_5 T_{\text{Крит}}}$		

Для получения аналитических зависимостей, характеризующих модель, использован широко известный подход, приведенный в [1, 3, 4]. Во избежание повторения известных положений опустим вывод и приведем итоговые выражения, характеризующие состояния графовой модели (табл. 2).

Тогда вероятности состояний исследуемого полумарковского процесса:

$$P_1 = \frac{p_{51} \pi_3 \bar{t}_1}{\pi_3 (\bar{t}_1 p_{51} + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4 p_{24} + \bar{t}_5)}, \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{\pi_3 \bar{t}_2 (p_{51} + p_{52})}{\pi_3 (\bar{t}_1 p_{51} + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4 p_{24} + \bar{t}_5)}, \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{\pi_3 \bar{t}_3}{\pi_3 (\bar{t}_1 p_{51} + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4 p_{24} + \bar{t}_5)}, \quad (4)$$

$$P_4 = \frac{\pi_3 \bar{t}_4 (p_{51} p_{24} + p_{52} p_{24})}{\pi_3 (\bar{t}_1 p_{51} + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4 p_{24} + \bar{t}_5)}, \quad (5)$$

$$P_5 = \frac{\pi_3 \bar{t}_5 p_{35}}{\pi_3 (\bar{t}_1 p_{51} + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4 p_{24} + \bar{t}_5)}. \quad (6)$$

Полученные зависимости определяют вероятности нахождения элемента ТлОб в состояниях исследуемого эксплуатационного процесса. Так, например, показатель P_1 представляет собой комплексный показатель надежности – коэффициент готовности, а выражение (2) моделирует связь между параметрами безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости и интегральным показателем, в качестве которого используется $K_{Гh}$.

Подставив в выражение (2) выражения для эксплуатационно-технических характеристик оборудования из табл. 2, получим выражение, позволяющее оценить влияние элементов одной номенклатуры на коэффициент готовности оборудования:

$$K_{Гh} = \frac{1}{\lambda_h} e^{-(\omega_{5h} T_{7h})} / \left(\frac{1}{\lambda_h} e^{-(\omega_{5h} T_{7h})} + t_{2h} + t_{3h} + (1 - e^{-\frac{n_h T_{10h}}{\lambda_h}} \sum_{k=0}^{m_h} \frac{(\frac{n_h T_{10h}}{\lambda_h})^k}{k!}) \cdot t_{4h} + t_{5h} \right), \quad (7)$$

где λ_h – интенсивность отказа h -го элемента;

t_{2h} – математическое ожидание длительности контроля технического состояния;

t_{3h} – математическое ожидание времени восстановления;

t_{4h} – математическое ожидание длительности ожидания поставки h -го элемента ЗИП, отсутствующих на объекте эксплуатации;

t_{5h} – математическое ожидание срока сохраняемости h -го элемента ЗИП;

T_{7h} – математическое ожидание длительности контроля технического состояния;

T_{10h} – период пополнения h -го элемента ЗИП.

Предложенная модель отличается от известных [2, 3, 5] тем, что она позволяет рассчитать значение K_r ТлОб РКК в зависимости от параметров его безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Для определения величины затрат на реализацию стратегии пополнения элементов ЗИП одной номенклатуры в течение назначенного срока службы оборудования можно воспользоваться следующим выражением:

$$C_h^\Sigma = mC_h^{xp} / 2 + (\lambda_h T_{нсс} - 1)C_h^{пост} + mC_h^{обсл} / 2, \quad (8)$$

где C_h^{xp} – затраты на хранение элемента ЗИП одной номенклатуры в период назначенного срока службы ТлОб;

$C_h^{пост}$ – затраты на поставку элементов ЗИП одной номенклатуры взамен израсходованных в течение назначенного срока службы ТлОб;

$C_h^{обсл}$ – затраты на обслуживание элемента ЗИП одной номенклатуры.

m_h – количество элементов ЗИП одной номенклатуры, необходимое для обеспечения требуемого уровня готовности ТлОб в течение периода пополнения.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим применение моделей для выбора оптимальных стратегий пополнения комплекта ЗИП агрегата заправки, обеспе-

чивающих значение коэффициента готовности агрегата не ниже 0,99 в течение 10 лет эксплуатации.

Пусть поток отказов простейший, параметр потока отказов примем равным интенсивности отказов. Аналогично примем параметры потока ω_3 и ω_5 как величины обратно пропорциональные математическим ожиданиям длительностей соответствующих процессов.

Для проведения расчетов рассмотрим три варианта стратегий пополнения комплекта ЗИП, являющихся предельными случаями:

- закладка на весь срок службы;
- периодическое пополнение (с периодом 1 год);
- непрерывное пополнение.

В табл. 3 представлены результаты расчетов для комплекта ЗИП агрегата 11Г101, полученные при использовании описанных выше моделей.

Таблица 3

Результаты расчетов

Номенклатура комплекта ЗИП		Стратегия пополнения	Требуемое количество элементов h -й номенклатуры ЗИП для обеспечения требуемого K_T	Стоимость стратегии на срок службы		
1		2	3	4		
Номенклатура 1		Закладка на весь срок службы	135 эл.	2 675 ден. ед.		
$\omega_1 \equiv \lambda_1$	0,0003		Периодическое пополнение	21 эл.	2 150 ден. ед.	
$\omega_3 \equiv \frac{1}{T_B}$	0,25			Непрерывное пополнение	10 эл.	2 600 ден. ед.
$\omega_5 \equiv \frac{1}{T_{\text{Сохр}}}$	0,0006					
T_d	2					
$T_{\text{Кге}}$	1,5					
n	4					
Номенклатура 2		Закладка на весь срок службы	78 эл.	2 390 ден. ед.		
$\omega_1 \equiv \lambda_1$	0,0002		Периодическое пополнение	12 эл.	1 720 ден. ед.	
$\omega_3 \equiv \frac{1}{T_B}$	0,3			Непрерывное пополнение	8 эл.	1 700 ден. ед.
$\omega_5 \equiv \frac{1}{T_{\text{Сохр}}}$	0,0008					
T_d	2,5					
$T_{\text{Кге}}$	1					
n	3					

Окончание табл. 3				
1	2	3	4	
Номенклатура 3	Закладка на весь срок службы	147 эл.	2 735 ден. ед.	
$\omega_1 \equiv \lambda_1$		0,00025	Периодическое пополнение	21 эл.
$\omega_3 \equiv \frac{1}{T_B}$		0,25		
$\omega_5 \equiv \frac{1}{T_{\text{Сохр}}}$		0,0003	Непрерывное пополнение	11 эл.
T_d		1,5		
$T_{\text{Кте}}$		1,5		
n		5		
Номенклатура 4	Закладка на весь срок службы	91 эл.	2 455 ден. ед.	
$\omega_1 \equiv \lambda_1$		0,00035	Периодическое пополнение	14 эл.
$\omega_3 \equiv \frac{1}{T_B}$		0,35		
$\omega_5 \equiv \frac{1}{T_{\text{Сохр}}}$		0,0005	Непрерывное пополнение	6 эл.
T_d		2		
$T_{\text{Кте}}$		1,5		
n		2		
Номенклатура 5	Закладка на весь срок службы	140 эл.	2 700 ден. ед.	
$\omega_1 \equiv \lambda_1$		0,00015	Периодическое пополнение	19 эл.
$\omega_3 \equiv \frac{1}{T_B}$		0,25		
$\omega_5 \equiv \frac{1}{T_{\text{Сохр}}}$		0,0007	Непрерывное пополнение	15 эл.
T_d		2,5		
$T_{\text{Кте}}$		2		
n		8		

Из анализа табл. 3 следует, что для номенклатур 1 и 4 оптимальной является стратегия периодического пополнения ЗИП, а для номенклатур 2, 3 и 5 – непрерывного пополнения.

Выводы

Предложена новая модель обеспечения готовности ТЛОБ РКК, которая может быть применима для решения задачи

определения совокупности оптимальных стратегий пополнения элементов ЗИП каждой номенклатуры по критерию «готовность – стоимость» с учетом параметров безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Список литературы

1. Бояршинов С.Н., Дьяков А.Н., Решетников Д.В. Моделирование системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем // Вооружение и экономика. – М.: Региональная общественная организация «Академия проблем военной экономики и финансов», 2016. – № 3 (36). – С. 35–43.

2. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 400 с.

3. Дьяков А.Н. Модель процесса поддержания готовности технологического оборудования с обслуживанием после отказа // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Вып. 651. Под общ. ред. Ю.В. Кулешова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 272 с.

4. Кокарев А.С., Марченко М.А., Пачин А.В. Разработка комплексной программы повышения ремонтпригодности сложных технических комплексов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4–3. – С. 501–505.

5. Шура-Бура А.Э., Топольский М.В. Методы организации, расчета и оптимизации комплектов запасных элементов сложных технических систем. – М.: Знание, 1981. – 540 с.