

УДК 629.7.084

МОДЕЛЬ ГОТОВНОСТИ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Богдан А.Н., Поляков А.П., Поляков С.А.

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

Настоящая статья посвящена описанию модели готовности системы обеспечения запасными частями технологического оборудования ракетно-космического комплекса, позволяющей сформировать оптимальный комплект запасных частей и стратегии его пополнения для изделия военной техники. Для определения оптимального комплекта запасных частей и стратегий его пополнения используется метод динамического программирования, разработанный Беллманом. Данный метод имеет ряд достоинств, к которым относятся наглядность и простота применения. Полученная модель позволяет сформировать систему обеспечения запасными частями изделия военной техники, при выполнении требований к коэффициенту готовности изделия и минимальных затратах на его обеспечение. Для решения данной задачи были проанализированы известные модели, позволяющие формировать требования к системам обеспечения запасами, в которых предлагается проводить расчеты их структуры эшелонирования, номенклатурного и количественного состава, а также периодичность пополнения для каждой номенклатуры запасных частей, существенно влияющей на величину затрат на доставку, хранение и обслуживание. Применение разработанных моделей позволяет одновременно формировать количественный состав запасных частей и стратегии его пополнения. В статье приводится пример применения модели для синтеза оптимальной системы обеспечения запасами автоматизированной системы управления техническим комплексом.

Ключевые слова: система обеспечения запасными частями, коэффициент готовности, надежность, запасная часть

MODEL OF READINESS OF THE SYSTEM FOR PROVIDING SPARE PARTS FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF THE ROCKET AND SPACE COMPLEX

Bogdan A.N., Polyakov A.P., Polyakov S.A.

*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 of readiness of the system for providing spare parts for technological equipment of the rocket and space complex, which allows to form an optimal set of spare parts and strategies for its replenishment for military equipment products. The dynamic programming method developed by Bellman is used to determine the optimal set of spare parts and strategies for its replenishment. This method has a number of advantages, which include visibility and ease of use. The resulting model allows you to create a system for providing spare parts for military equipment, while meeting the requirements for the product readiness coefficient and minimum costs for its provision. To solve this problem, we analyzed the known models that allow us to form requirements for inventory systems, in which it is proposed to calculate their separation structure, nomenclature and quantitative composition, as well as the frequency of replenishment for each nomenclature of spare parts, which significantly affects the amount of costs for delivery, storage and maintenance. The use of the developed models allows you to simultaneously form the quantitative composition of spare parts and strategies for its replenishment. The article provides an example of using the model to synthesize an optimal inventory management system for an automated technical complex management system.

Keywords: spare parts supply system, availability factor, reliability, spare part

Для того чтобы гарантировать требуемую надежность технологического оборудования (ТлОб) ракетно-космических комплексов (РКК), придается система обеспечения запасными частями (ЗЧ), которая включает средства для проведения диагностических и ремонтных работ, запасные части и т.д.

Основу комплекта запасных частей и принадлежностей составляют ЗЧ, а их запас определяется начальным количеством, общими затратами и периодичностью пополнения. Под отказом запаса будем понимать событие, заключающееся в том, что заявка на ЗЧ не удовлетворяет-

ся в ЗИП, по причине того, что на момент её поступления требуемая номенклатура в ЗИП отсутствует.

В соответствии с [1] под стратегией пополнения запаса понимается ряд правил, на основании которых пополняют запас в комплекте ЗИП. Этими правилами определяются временные границы, длительность и источник пополнения.

В соответствии с [1] предлагаются следующие стратегии пополнения запасов:

- периодическое;
- периодическое пополнение с экстренными доставками;
- непрерывное;

– пополнение по уровню неснижаемого запаса.

Однако в научной литературе [2–4] предлагается использовать ещё две стратегии пополнения, это поставка ЗЧ на весь назначенный срок службы и поставка ЗЧ при возникновении отказа от производителя. Применение данных стратегий пополнения обусловлено в первом случае огромными затратами на лишние ЗЧ и их эксплуатацию (хранение, ТО, ремонт), но довольно высокой готовностью оборудования; для второго – низкая готовность оборудования, высокие затраты на транспортирование ЗЧ и на поддержание в рабочем состоянии оборудования, его производящего, но исключение затрат на «лишние» ЗЧ.

Таким образом, в предлагаемой модели будут рассматриваться следующие стратегии пополнения:

- поставка ЗЧ на весь назначенный срок службы;
- периодическое пополнение с периодом 1 год;
- поставка ЗЧ при возникновении отказа от производителя.

Цель исследования: разработка модели готовности системы обеспечения запасными частями технологического оборудования ракетно-космического комплекса, позволяющей сформировать оптимальное сочетание объема и стратегий пополнения комплектов ЗЧ ТлОб РКК, обеспечивающих требуемое значение коэффициента готовности оборудования с учётом минимальных затрат.

Модель готовности системы обеспечения ЗЧ ТлОб РКК

Элемент может одновременно находиться лишь в одном состоянии $i = 1, \dots, n$ из всего множества (рисунок). В момент времени $t=0$ элемент находится в одном из состояний $i \in E$ и проводит в нем случайное время τ_1 . В момент времени $t = \tau_1$ элемент мгновенно перемещается 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 элемент пребывает случайное время τ_j , распределенное по закону с произвольной функцией распределения и затем переходит в очередное состояние и т.д.

Для получения характеризующих модель зависимостей использован подход, приведенный в [4]. Опустим выводы и вычисления и приведем итоговые выражения, описывающие состояния графовой модели (табл. 1).

Вероятность нахождения в работоспособном состоянии Z1 является, по сути, коэффициентом готовности, по которому можно судить о её функционировании, причем

$$K_G = \bar{t}_1 p_{51} / (\bar{t}_1 p_{51} + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4 p_{24} + \bar{t}_5). \quad (1)$$

Для определения зависимости коэффициента готовности h -й номенклатуры от количества ЗЧ и стратегий их пополнения подставим в выражение (1) вышеприведенные вероятностные и временные характеристики модели и получим следующую зависимость

$$K_{G_h}(m_h, S_h) = e^{-\frac{t_h^{\text{конт}}}{t_h^{\text{сопр}}}} / \left(\lambda_h \left(\frac{e^{-\frac{t_h^{\text{конт}}}{t_h^{\text{сопр}}}}}{\lambda_h} + t_h^{\text{диагн}} + \right. \right. \\ \left. \left. + 2t_h^{\text{восст}} + t_h^{\text{пост}} \left(1 - e^{-n\lambda_h \left(t^{\text{нсс}} S_{h1} + t^r S_{h2} + \frac{S_{h3}}{\lambda_h} \right)} \sum_{k=0}^m \frac{n_h \lambda_h \left(t^{\text{нсс}} S_{h1} + t^r S_{h2} + \frac{S_{h3}}{\lambda_h} \right)^k}{k!} \right) + t_h^{\text{сопр}} - t_h^{\text{сопр}} e^{-t_h^{\text{конт}} / t_h^{\text{сопр}}} \right), \quad (2)$$

где λ_h – интенсивность отказов ЗЧ h -й номенклатуры;

$t_h^{\text{пост}}$ – математическое ожидание времени поставки ЗЧ h -й номенклатуры;

$t_h^{\text{восст}}$ – математическое ожидание времени восстановления ЗЧ h -й номенклатуры;

$t_h^{\text{конт}}$ – математическое ожидание времени контроля оборудования после замены ЗЧ h -й номенклатуры;

$t_h^{\text{диагн}}$ – математическое ожидание длительности выявления причины выхода

из строя оборудования, связанного с отказом ЗЧ h -й номенклатуры;

$t_h^{\text{сопр}}$ – математическое ожидание времени сохранения ЗЧ h -й номенклатуры, находящейся в комплекте ЗЧ;

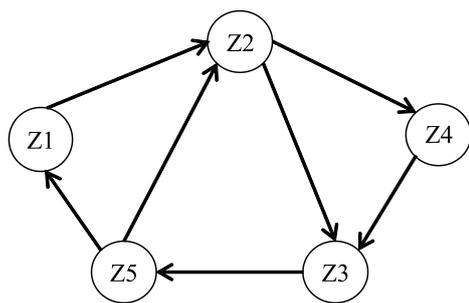
m_h – количество ЗЧ h -й номенклатуры;

S – множество стратегий пополнения ЗЧ;

n_h – количество однотипных элементов h -й номенклатуры в оборудовании;

t^r – период, равный одному году;

$t^{\text{нсс}}$ – назначенный срок службы системы.



Z1 – работоспособное состояние;
Z2 – неработоспособное состояние;
Z3 – состояние ремонта;
Z4 – состояние поставки ЗЧ при её отсутствии на объекте эксплуатации;
Z5 – состояние контроля работоспособности после ремонта.

Модель готовности системы обеспечения ЗЧ ТЛОб РКК

Таблица 1

Вероятностные и временные характеристики модели готовности системы обеспечения ЗЧ ТЛОб РКК

Переходы $i-j$	$Q_{ij}(t)$	P_{ij}
1-2	$Q_{12} = 1 - e^{-\lambda_h (t^{исс} S_{h1} + t^r S_{h2} + S_{h3} / \lambda_h)}$	$p_{12} = 1$
2-3	$Q_{23} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_h^{диагн}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_h^{диагн}. \end{cases}$	$p_{23} = e^{-n\lambda_h \left(t^{исс} S_{h1} + t^r S_{h2} + \frac{S_{h3}}{\lambda_h} \right)} \sum_{k=0}^m \left(n_h \lambda_h \left(t^{исс} S_{h1} + t^r S_{h2} + \frac{S_{h3}}{\lambda_h} \right) \right)^k / k!$
2-4	$Q_{24} = \begin{cases} 1, & \text{при } t < t_h^{диагн}; \\ 0, & \text{при } t \geq t_h^{диагн}. \end{cases}$	$p_{24} = 1 - e^{-n\lambda_h \left(t^{исс} S_{h1} + t^r S_{h2} + \frac{S_{h3}}{\lambda_h} \right)} \sum_{k=0}^m \left(n_h \lambda_h \left(t^{исс} S_{h1} + t^r S_{h2} + \frac{S_{h3}}{\lambda_h} \right) \right)^k / k!$
3-5	$Q_{35} = 1 - (1 + t / t_h^{восст}) e^{-t / t_h^{восст}}$	$p_{35} = 1$
4-3	$Q_{43} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_h^{пост}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_h^{пост}. \end{cases}$	$p_{43} = 1$
5-1	$Q_{51} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_h^{конт}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_h^{конт}. \end{cases}$	$p_{51} = e^{-t_h^{конт} / t_h^{коп}}$
5-2	$Q_{52} = 1 - e^{-t_h^{конт} / t_h^{коп}}$	$p_{52} = 1 - e^{-t_h^{конт} / t_h^{коп}}$
Переходы $i-j$	$F_i(t)$	\bar{t}_i
1-2	$F_1(t) = 1 - e^{-\lambda_h (t^{исс} S_{h1} + t^r S_{h2} + S_{h3} / \lambda_h)}$	$\bar{t}_1 = 1 / \lambda_h$
2-3 2-4	$F_2(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_h^{диагн}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_h^{диагн}. \end{cases}$	$\bar{t}_2 = t_h^{диагн}$
3-5	$F_3 = 1 - (1 + t / t_h^{восст}) e^{-t / t_h^{восст}}$	$\bar{t}_3 = 2 t_h^{восст}$
4-3	$Q_4(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_h^{пост}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_h^{пост}. \end{cases}$	$\bar{t}_4 = t_h^{пост}$
5-1 5-2	$F_5(t) = \begin{cases} 1 - e^{-t_h^{конт} / t_h^{коп}}, & \text{при } t < t_h^{конт}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_h^{конт}. \end{cases}$	$\bar{t}_5 = t_h^{коп} - t_h^{коп} e^{-t_h^{конт} / t_h^{коп}}$

*Модель затрат на обеспечение ЗЧ
при различных стратегиях пополнения*

Выбор стратегии пополнения определяется многими факторами:

- наличием производства запасов и их доступностью;
- расстояниями от производителей до потребителя;
- стоимостью доставки запасов;
- наличием складов;
- возможностями организации хранения;
- мобильностью потребителя и др.

Однако для проведения обоснованного выбора стратегии пополнения необходимо построить стоимостную модель, позволяющую получить величину затрат на обеспечение ЗЧ, учитывающую не только требуемое количество ЗЧ, но и различные стратегии пополнения. К затратам на обеспечение ЗЧ будем относить затраты на закупку ЗЧ, их поставку, хранение и обслуживание.

При выборе множества стратегий пополнения необходимо учесть особенности эксплуатации ТлОб РКК и требования эксплуатационной документации на оборудование.

В данной модели учтены следующие стратегии пополнения:

- пополнение ЗЧ на весь назначенный срок службы;
- ежегодное пополнение ЗЧ;
- пополнение ЗЧ с периодом её средней наработки на отказ.

Учитывая описанное выше, модель затрат на обеспечение ЗЧ при различных стратегиях пополнения будет иметь следующий вид

$$C_h^\Sigma(m_h, S_h) = m_h(S_h)C_h + \beta(S_h)C_h^{\text{пост}} + \beta \sum_{k=1}^{t^n} (m_h(S_h) - (k-1)\lambda_h n_h t^r) * (C_h^{\text{хр}} + C_h^{\text{обсл}}), \quad (3)$$

где S_{h1} – поставка ЗЧ h -й номенклатуры на период назначенного срока службы ($t^n = t^{\text{нсс}}$);

S_{h2} – периодическое пополнение ЗЧ h -й номенклатуры ($t^n = t^r$);

S_{h3} – периодическое пополнение ЗЧ h -й номенклатуры ($t^n = 1/\lambda_h$);

$C_h^{\text{обсл}}$ – годовые затраты на обслуживание одной ЗЧ h -й номенклатуры;

$C_h^{\text{пост}}$ – стоимость одной поставки ЗЧ h -й номенклатуры;

C_h – стоимость покупки одной ЗЧ h -й номенклатуры;

$C_h^{\text{хр}}$ – годовые затраты на хранение одной ЗЧ h -й номенклатуры;

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

t^n – период пополнения ЗЧ;

$\beta = \left\lceil \frac{t^{\text{нсс}}}{t^n} \right\rceil$ – количество поставок ЗЧ.

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

Для синтеза объема и стратегий пополнения комплекта ЗЧ оборудования, состоящего из множества запасных частей, воспользуемся алгоритмом, который позволит сформировать количественный состав ЗЧ и оптимальные стратегии его пополнения, обеспечивающие коэффициент готовности изделия не ниже заданного, а объем затрат минимальным [5]. Основу алгоритма составляет метод динамического программирования.

Пример применения моделей

Рассмотрим применение моделей для формирования оптимального комплекта ЗЧ и стратегий его пополнения автоматизированной системы управления техническим комплексом, позволяющих обеспечить коэффициент готовности системы не ниже 0,97 в течение назначенного срока эксплуатации (13 лет).

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

В нашем случае отказ любого элемента системы приводит к отказу всей системы. Исходя из этого, коэффициент готовности системы будем определять как произведение частных коэффициентов готовности входящих в неё составных элементов. Значение частного коэффициента готовности системы, без элементов номенклатуры комплекта ЗЧ, составляет 0,9775. Зная требуемое значение коэффициента готовности системы и значение его частного коэффициента готовности, получим требуемое значение коэффициента готовности системы обеспечения ЗЧ, равное 0,9923.

Для получения оптимального количественного состава ЗЧ и стратегий его пополнения воспользуемся алгоритмом определения количественного состава комплекта ЗЧ и стратегий его пополнения. Использование алгоритма позволило сформировать состав ЗЧ и стратегии его пополнения для номенклатуры комплекта ЗЧ (табл. 2).

Таблица 2
Состав и стратегии пополнения ЗЧ

№ п/п	Наименование ЗЧ	Кол-во / стратегия пополнения
1	Изделие BHN-429	22/3
2	Изделие PPD	15/3
3	Изделие MV 24/5	31/2
4	Изделие PT	7/3
5	Изделие CSNH-800X	45/3
6	Изделие OBN	50/2
7	Изделие NYU-502	10/3
8	Изделие MV 24/12	39/2
9	Изделие NEOVO-19A	3/1
10	Изделие GHV-0234	23/3

Стоимость обеспечения ЗЧ составит 7018 ден. ед.

Результаты исследования и их обсуждение

Результатом данного исследования является разработка Модели готовности системы обеспечения ЗЧ и Модели затрат на обеспечение ЗЧ при различных стратегиях пополнения, позволяющих снизить затраты на обеспечение ЗЧ при выполнении требований к коэффициенту готовности системы. Полученные результаты обсуждались в ходе двух конференций.

Заключение

Описанная в статье модель готовности системы обеспечения ЗЧ ТлОб РКК построена на основе полумарковского подхода, что позволяет ей быть достаточно гибкой и учесть особенности эксплуатации ТлОб РКК. Она отличается от известных тем, что в ней кроме экспоненциального закона применены законы Эрланга и Пуассона. Применение модели позволяет оценить взаимовлияние объема и стратегии пополнения ЗЧ на коэффициент готовности системы.

Список литературы

1. ГОСТ 27.507 – 2015 «Запасные части, инструмент и принадлежности. Оценка и расчет запасов». М.: Стандартинформ, 2015. 48 с.
2. Миронов А.Н., Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. СПб.: Издательство «Лань», 2011. 349 с.
3. Шура-Бура А.Э., Топольский М.В. Методы организации, расчета и оптимизации комплектов запасных элементов сложных технических систем. М.: Знание, 1981. 540 с.
4. Дьяков А.Н., 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. Вып. 658. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. С. 130–138.
5. Богдан А.Н., Поляков А.П., Чернобаев А.Ю. Методика формирования и пополнения комплекта запасных частей технологического оборудования ракетно-космических комплексов с учетом доступности покупных комплектующих изделий // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 5. С. 15–19.