

## МЕТОДИКА ВЫБОРА СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

<sup>1</sup>Дьяков А.Н., <sup>1</sup>Кокарев А.С., <sup>1</sup>Решетников Д.В.

<sup>1</sup>Федеральное государственное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург, e-mail: reshetnikovdv@yandex.ru

В статье рассматривается проблематика практического применения концепции управления стоимостью жизненного цикла ракетно-космической техники. Приводится краткий анализ методов управления эксплуатационными затратами, применяемых в настоящее время. Обосновывается необходимость разработки моделей и методов управления затратами при эксплуатации ракетно-космической техники. Предлагаемая в статье методика, в отличие от известных, учитывает вероятностный характер возникновения неисправностей и широкий спектр эксплуатационных процессов. Рассматриваемая методика направлена на оптимизацию эксплуатационных затрат при заданном значении коэффициента готовности. Заложенные в методику модели реализуют современные формы организации технического обслуживания и ремонта ракетно-космической техники. В результате реализации методики получена функция чувствительности, которая представляет собой зависимость коэффициентов готовности от условно-оптимальных величин эксплуатационных затрат. Каждое из полученных значений коэффициента готовности соответствует конкретному набору стратегий технического обслуживания и ремонта составных частей ракетно-космической техники.

Ключевые слова: управление стоимостью жизненного цикла, техническое обслуживание и ремонт, ракетно-космическая техника, стратегия технического обслуживания и ремонта, управление эксплуатационными затратами

## METHOD OF SELECTING A STRATEGY OF MAINTENANCE AND REPAIR ROCKET AND SPACE TECHNICS

<sup>1</sup> Dyakov A.N., <sup>1</sup>Kokarev A.S., <sup>1</sup>Reshetnikov D.V.

<sup>1</sup>Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, Russia (197198, Sankt-Petersburg, street Zhdanovskaja, 13), e-mail: reshetnikovdv@yandex.ru.

The article discusses the problems of practical application of the concept of life cycle cost of rocket and space technology. A brief analysis of the methods of management of operating costs currently used. The rationale for the development of models and methods of cost management in the operation of rocket and space technology. The proposed method, in contrast to the known, takes into account the probabilistic nature of the defect and a broad range of operational processes. The technique is aimed at the optimization of operating costs for a given value of the coefficient of readiness. Inherent in the methodology of the model implement modern forms of organization of maintenance and repair of missile and space technology. As a result of implementation of the methodology obtained sensitivity function, which represents the dependence of the coefficients of readiness from the conditionally optimal values of operating costs. Each of the received values of the coefficient of readiness to meet the specific set of strategies of maintenance and repair parts missile and space technology

Keywords: Life cycle cost management, maintenance and repair, rocket and space technology, the maintenance strategy and repair, management of operating costs

В XXI в. технологическое развитие производства продукции достигло такого уровня, когда главным фактором в конкурентной борьбе становятся не столько качество и стоимость продукции, сколько степень удовлетворения продукцией потребителя. Потребителя сложной технической продукции все более интересует не стоимость приобретения, а величина последующих затрат на владение полученной продукцией. Реализация данного подхода к производству сложной технической продукции нашла отражение в концепции управления стоимостью жизненным циклом. Данная концепция получила широкое применение в

промышленности развитых стран, наибольшее развитие получила в их военно-промышленных комплексах [2]. Методики оптимизации затрат, применяемые коммерческими организациями в рамках концепции, как правило, нацелены на получение максимальной прибыли и, как показывает проведенный анализ, решают первостепенную задачу – поиск минимальной величины затрат [5]. При производстве и эксплуатации продукции военного назначения, в том числе ракетно-космической техники, величина затрат, как правило, имеет второстепенное значение, на первом месте — обеспечение требуемого показателя коэффициента готовности. Следовательно, современные коммерческие методики не могут быть применены для ракетно-космической техники без доработки. В то же время методики управления стоимостью, используемые в настоящее время в ракетно-космической отрасли, также не в полной мере соответствуют современным требованиям, так как они имеют калькуляционный характер и не учитывают вероятностный характер возникновения отказов, а также не всегда отражают разнообразие применяемых в настоящее время эксплуатационных процессов и форм организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Исходя из вышесказанного предлагается методика оптимизации эксплуатационных затрат ракетно-космической техники, которая предполагает моделирование ТОиР с помощью четырех стратегий, таких как:

- 1) календарная стратегия ТОиР;
- 2) стратегия ТОиР, предусматривающая периодическое выполнение мероприятий технического обслуживания и постоянный мониторинг технического состояния;
- 3) стратегия ТОиР, предусматривающая периодическое выполнение мероприятий технического обслуживания и периодический мониторинг технического состояния;
- 4) стратегия ТОиР без планового технического обслуживания.

По полученным значениям коэффициентов готовности и величин затрат на ТОиР методом динамического программирования производится синтез структуры системы ТОиР, при которой заданному значению коэффициента готовности соответствует минимальное значение эксплуатационных затрат.

### **Модели системы ТОиР для расчета эксплуатационных затрат**

Исторически система поддержания работоспособного состояния сложной технической продукции организовывалась по календарной стратегии обслуживания, в основу которой заложены среднестатистические данные по всей совокупности идентичных изделий. При календарной стратегии, как правило, назначался единый межрегламентный период [1].

Календарная стратегия ТОиР представлена графоаналитической моделью (рис. 1)

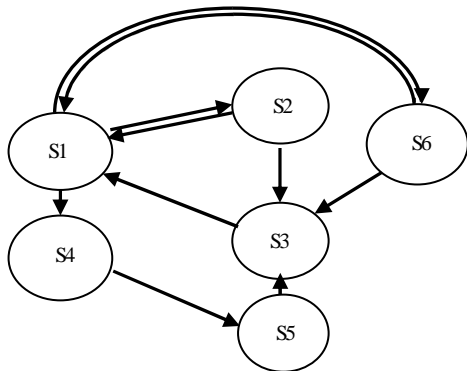


Рис. 1. Граф модели календарной системы обслуживания

S1 – агрегат работоспособен, готов к применению по назначению;  
 S2 – проводится проверка на функционирование, техническое обслуживание;  
 S3 – агрегат неработоспособен, проводятся ремонтно-восстановительные работы;  
 S4 – скрытый отказ, агрегат неработоспособен, в межрегламентный период отказ не выявлен;  
 S5 – проверка на функционирование, после скрытого отказа;  
 S6 – на агрегате проводятся плановое метрологическое обслуживание, мероприятия по техническому освидетельствованию (диагностированию).

и аналитическими зависимостями:

$$K_G^1 = f(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_6, \lambda_i, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_6); \quad (1)$$

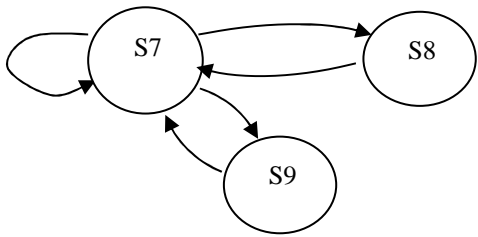
$$C_3^1 = f(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_6, \lambda_i, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_6, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6). \quad (2)$$

В представленной модели коэффициент готовности изделия и величина эксплуатационных затрат являются функциями от следующих эксплуатационно-технических параметров:  $\tau_1$  — периодичность технического обслуживания (ТО);  $\tau_2$  — длительность проведения ТО;  $\tau_3$  — периодичность проведения метрологического обслуживания (МлОб);  $\tau_6$  — длительность проведения МлОб;  $\omega_1$  — параметр распределения Эрланга;  $\omega_2$  — параметр потока отказов при ТО;  $\omega_3$  — параметр потока ложных отказов при ТО;  $\omega_6$  — параметр потока отказов при выполнении мероприятий МлОб;  $C_i$  — величины затрат при нахождении изделия в каждом из состояний;  $\lambda_i$  — интенсивность отказа  $i$ -ой составной части изделия.

Календарная система ТОиР в настоящее время широко представлена в системе эксплуатации ракетно-космической техники. Ее отличает высокий уровень обеспечиваемого коэффициента готовности, но она сопряжена со значительными эксплуатационными затратами [4].

В последние десятилетия в связи с широким распространением цифровых технологий, удешевлением различных систем мониторинга технического состояния (ТС) все большее применение получает более прогрессивная стратегия эксплуатации по состоянию. В зависимости от величины затрат на обеспечение изделия средствами контроля технического состояния и особенностей его эксплуатации можно выделить две наиболее известные стратегии ТОиР.

1. Система технического обслуживания и ремонта, предусматривающая периодическое выполнение мероприятий технического обслуживания и постоянный мониторинг технического состояния, граф модели представлен на рисунке 2.



S7 – работоспособное состояние, проводится мониторинг технического состояния  
 S8 – проводятся ремонтно-профилактические работы  
 S9 – проводятся ремонтно-восстановительные работы

Рис. 2. Граф состояний системы эксплуатации стратегии обслуживания по состоянию с постоянным мониторингом ТС

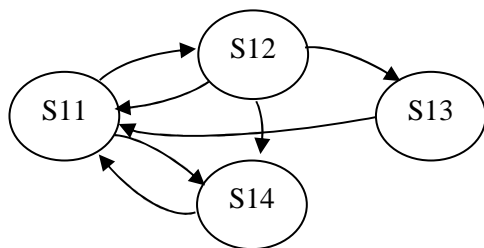
Представленная модель характеризуется аналитическими выражениями:

$$K_G^2 = f(T_H, T_B, T_{ПП}, \omega_7, \omega_9, \alpha^2, \beta^2); \quad (3)$$

$$C_G^2 = f(T_H, T_B, T_{ПП}, \omega_7, \omega_9, \alpha^2, \beta^2, C_7, C_8, C_9), \quad (4)$$

Коэффициент готовности и величина затрат являются функциями переменных величин  $[T_H; T_B]$  – диапазон достижения предотказного состояния по контролируемому параметру и начала проведения РПР,  $T_{ПП}$  – длительность проведения ремонтно-профилактических работ (РПР),  $\omega_7$  – параметр потока отказов работоспособного агрегата,  $\omega_9$  – параметр Эрланга, характеризующий интенсивность проведения ремонтно-восстановительных работ (РВР),  $\alpha^2$  – ошибка контроля ТС первого рода,  $\beta^2$  – ошибка контроля ТС второго рода.

2. Система технического обслуживания и ремонта, предусматривающая периодическое выполнение мероприятий технического обслуживания и периодический мониторинг технического состояния, граф модели представлен на рисунке 3.



S11 – работоспособное состояние  
 S12 – проводится контроль технического состояния  
 S13 – проводятся ремонтно-профилактические работы  
 S14 – проводятся ремонтно-восстановительные работы

Рис. 3. Граф состояний системы эксплуатации стратегии обслуживания по состоянию с периодическим мониторингом ТС

Аналитические зависимости модели представлены выражениями:

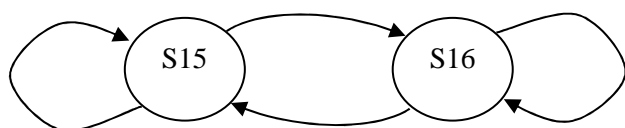
$$K_G^3 = f(\tau_M, T_M, T_{ПП}, \omega_{11}, \omega_{14}, \alpha^3, \beta^3); \quad (5)$$

$$C_G^3 = f(\tau_M, T_M, T_{ПП}, \omega_{11}, \omega_{14}, \alpha^3, \beta^3, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}), \quad (6)$$

В данной модели коэффициент готовности и величина эксплуатационных затрат являются функциями переменных величин:  $\tau_M$  – периодичность мониторинга ТС,  $T_M$  – длительность мониторинга ТС,  $T_{ПП}$  – длительность РПР,  $\omega_{11}$  – параметр потока отказов работоспособного агрегата,  $\omega_{14}$  – параметр Эрланга, характеризующий интенсивность

проведения РВР,  $\alpha^3$  — ошибка контроля ТС первого рода,  $\beta^3$  — ошибка контроля ТС второго рода.

В течение последнего десятилетия научно-технический прогресс существенно сократил жизненный цикл наукоемкой продукции. Технологии снижения стоимости производства позволили сформировать новую группу сложной технической продукции – это наукоемкая продукция, которая не требует обслуживания в течение всего срока службы. Как правило, срок службы подобной продукции невелик, а ее ремонт экономически нецелесообразен. Один из ярких примеров сложной технической продукции данной категории каждый из нас ежедневно использует в быту. Так, в любом из используемых нами мобильных телефонов может быть устранена любая неисправность, однако затраты на устранение отдельных неисправностей могут многократно превышать величину затрат на производство нового подобного изделия. Для моделирования процессов эксплуатации указанных изделий разработана графоаналитическая модель, граф которой представлен на рисунке 4.



S15 – работоспособное состояние изделия  
 S16 – состояние проведения ремонтно-восстановительных работ

*Рис. 4. Граф состояний системы технического обслуживания и ремонта без планового технического обслуживания*

Аналитические зависимости позволяющие рассчитать коэффициент готовности изделия и величину эксплуатационных затрат имеют вид:

$$K_r^4 = f(\lambda_{15}, \omega_{16}, \beta^4); \quad (7)$$

$$C_3^4 = f(\lambda_{15}, \omega_{16}, \beta^4, C_{15}, C_{16}), \quad (8)$$

где  $\lambda_{15}$  — интенсивность отказа;

$\omega_{16}$  — параметр Эрланга;

$\beta^4$  — ошибка второго рода, вероятность ложного ремонта.

Порядок применения представленных моделей, а также вывод аналитических зависимостей описаны в [3, 4].

### **Выбор стратегии ТОиР с целью оптимизации эксплуатационных затрат**

Применение представленных моделей позволяет рассчитать коэффициент готовности ракетно-космической техники и величину эксплуатационных затрат при различных стратегиях ТОиР. Полученные результаты могут служить основанием для выбора наиболее эффективной стратегии ТОиР для отдельного изделия. Однако, если необходимо синтезировать стратегию ТОиР комплекса, состоящего из множества сложных технических систем, то потребуется алгоритм, который позволит выбрать такое сочетание стратегий ТОиР отдельных изделий, при котором общий коэффициент готовности комплекса будет не

ниже заданного, а величина эксплуатационных затрат минимальной. В подобной постановке задача может быть записана в следующем виде:

Найти:

$$\bar{y}^* = \arg \min_{\bar{y} \in \Delta} \sum_{p=1}^P C_{\bar{y} p}^q(\bar{y}), \quad (9)$$

$$\Delta = \left\{ \bar{y} \in \Delta \left| \prod_{i=1}^P K_{\Gamma p}^q(\bar{y}) \geq K_{\Gamma_{\text{зад}}} (i = 1, 2, \dots, P) \right. \right\}; \quad (10)$$

где  $\bar{y} = \{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_p, \dots, \bar{y}_P\}$ , где  $P$  – количество изделий в составе комплекса ракетно-космической техники;

$\bar{y}_p = [\bar{y}_p^1, \bar{y}_p^2, \bar{y}_p^3, \bar{y}_p^4]^T$ , где  $q \in [1, 2, 3, 4]$  – количество стратегий ТООР, применимых для изделия  $p$ ;

Так как каждая из функций (1-8) является позиномом, а функция (9) сепарабельна, то для решения поставленной задачи предпочтительно использовать метод динамического программирования, при этом результатом решения является спектр коэффициентов готовности, каждому из которых соответствует условно оптимальная величина затрат.

Решение задачи выбора может быть представлено в следующем виде:

$$1. \Delta \xi_i = k + \psi \cdot g, \text{ где } k - \text{наименьшая величина затрат в } i\text{-ого изделия, } g = 0, 1, 2, 3, \dots, N; \quad (13)$$

$\Delta \xi_i$  – величина затрат на обслуживание  $i$ -ого изделия;

$\psi$  – шаг изменения  $\xi_i$ , наибольший общий делитель величин затрат;

$$2. f_1(\Delta \xi_1) = \max K_r^j(\Delta \xi_1); \quad (14)$$

Определение условно-оптимальной величины затрат на эксплуатацию первого изделия (системы) в составе комплекса:

$$3. F_1(\Delta \xi_1) = \max \prod_{j=1}^r f_j(\Delta \xi_1); \quad (15)$$

$$4. m_1^*(\Delta \xi_1) = \sum_{j=1}^N c^j - \text{условно оптимальная величина затрат изделия (системы);} \quad (16)$$

Определение условно-оптимальной величины затрат на эксплуатацию последующих изделий (систем изделий):

$$5. F_i(\Delta \xi_i) = \max \prod_{j=1}^r f_j(\Delta \xi_i); \quad (17)$$

$$6. m_i^*(\Delta \xi_i) = \sum_{j=1}^N c^j - \text{условно оптимальная величина затрат в } i\text{-м изделии;} \quad (18)$$

$$7. \xi_{i+1} = \xi_i + \Delta \xi_{i+1} - \text{общая величина нарастающим итогом с первого до } (i+1)\text{-ого изделия;} \quad (19)$$

$$8. F_i(\xi_i) = \max (F_{i-1}(\xi_{i-1}) \cdot F_i(\Delta \xi_i)); \quad (20)$$

$$9. m_i^*(\xi_i) = \sum_{j=1}^N c^j + m_{i-1}^*(\xi_{i-1}) - \text{условно оптимальная величина затрат изделий с 1-го по } i\text{-е;} \quad (21)$$

В результате решения задачи на ПЭВМ получена функция чувствительности, представленная на рисунке 5.

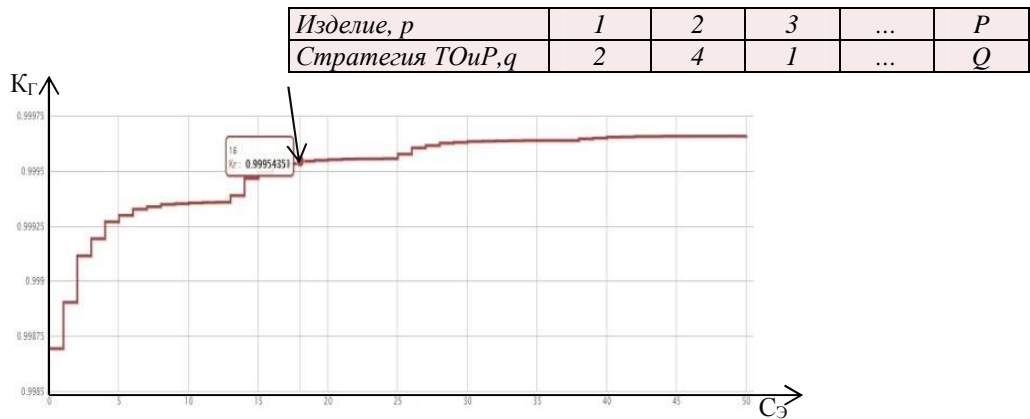


Рис. 5. Функция чувствительности комплекса сложных технических изделий

На графике представлены спектр значений коэффициента готовности комплекса и соответствующие им значения условно-оптимальных величин затрат. Представленное значение соответствует набору стратегий ТОиР для каждого изделия из состава комплекса, что позволит синтезировать такую стратегию ТОиР ракетно-космического комплекса, которая обеспечит минимальную величину затрат на ТОиР для требуемого значения показателя коэффициента готовности.

### Заключение

Представленная в статье методика позволяет произвести моделирование технического обслуживания и ремонта, а также рассчитать и сравнить коэффициенты готовности и соответствующие значения эксплуатационных затрат для различных стратегий ТОиР. Методика позволяет осуществлять синтез стратегии ТОиР комплекса, при этом в результате проведения расчетов может быть получено Парето-оптимальное множество значений коэффициента готовности, каждому из которых соответствуют условно-оптимальная величина эксплуатационных затрат и соответствующий набор стратегий ТОиР отдельных изделий. Методика отличается от известных тем, что учитывает вероятностный характер возникновения неисправностей, охватывает широкий спектр эксплуатационных процессов и современных форм технического обслуживания и ремонта. В отличие от известных коммерческих моделей и методик управления эксплуатационными затратами методика направлена на оптимизацию эксплуатационных затрат относительно заданного значения коэффициента готовности.

## Список литературы

1. Бром А.Е. Колобов А.А., Омельченко И.Н. Интегрированная логистическая поддержка жизненного цикла наукоемкой продукции: Учебник / А.Е. Бром, М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. – 296 с.
2. ГОСТ Р 53392–2009. Интегрированная логистическая поддержка. Анализ логистической поддержки. Основные положения. Москва. Стандартинформ. 2010. – 20 с.
3. Моделирование системы поддержания готовности технологического оборудования... / Дьяков А.Н. / Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники», инв. № 342258, – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 286 с.
4. Моделирование системы эксплуатации технологического оборудования ракетно-космического комплекса/ Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Решетников Д.В. /Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Выпуск 645 / Под ред. Ю.В. Кулешова. УДК 355.232.6:629.78 /ББК 68.55/ В 634. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 234 с.
5. Судов Е.В. Технологии интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения / А.И. Левин, А.В. Петров, Е.В. Чубарова – М.: ООО Издательский дом «ИнформБюро», 2006. – 232 с.

### Рецензенты:

Петров Г.Д., д.т.н., профессор, начальник кафедры, ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург;

Садин Д.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры, ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург.