

## ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЕДИНИЧНОМ ИСПОЛНЕНИИ

**В.И. Лукьяненко<sup>1</sup>, Н.В. Воробьева<sup>1</sup>, Ю.В. Воробьев<sup>2</sup>**

*Кафедры: «Высшая математика»,  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный  
университет (ММИ)», г. Москва (1); Ver\_Luk@mail.ru;  
«Теория машин, механизмов и детали машин», ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (2)*

**Ключевые слова и фразы:** гамма-процентный остаточный ресурс; интенсивность отказов; интервальная оценка; модель расходования ресурса; остаточный ресурс.

**Аннотация:** Рассмотрена модель расходования ресурса. По схеме усеченной выборки уточнена фактическая интенсивность отказов оборудования при конкретных условиях его эксплуатации. Предложены оценки среднего и гамма-процентного остаточного ресурса.

---

Установление срока безопасной эксплуатации технического оборудования имеет различные аспекты, одним из которых является методология оценки остаточного ресурса.

Задача оценки остаточного ресурса эксплуатируемого объекта относится к классу задач индивидуального прогнозирования и включает решение таких задач, как оценка текущего состояния, прогнозирование этого состояния в будущем, оценка вероятностей наступления отказов, оценка риска аварийных ситуаций. На основе этого прогноза устанавливается предельно-допустимый срок эксплуатации оборудования или назначается срок очередного контроля состояния исследуемого объекта.

Существует два основных направления определения остаточного ресурса: первое, основанное на физических предпосылках, и второе – вероятностные методы оценки.

Использование чисто физических методов оценки остаточного ресурса не позволяет, как правило, учесть многообразие реальных условий эксплуатации. При этом значения показателей ресурса, рассчитанные путем физических предположений, зачастую во много раз превышают значения, полученные путем обработки статистических данных.

Применение вероятностных методов оценки остаточного ресурса требует выполнения условия статистической устойчивости. Оценка остаточного ресурса уникального, существующего в единичном исполнении, оборудования является задачей индивидуального прогнозирования, когда предсказывается поведение отдельно взятого изделия за определенный период времени. В этом случае не выполняется условие статистической устойчивости и использование вероятностных выводов применительно к индивидуальному объекту сомнительно.

Наиболее перспективным направлением определения остаточного ресурса является использование физических представлений о ресурсных свойствах с применением вероятностных методов. Предлагаемая методика оценки остаточного ресурса реализует этот подход на примере турбокомпрессорного оборудования в единичном исполнении.

Под остаточным ресурсом объекта понимается его наработка после некоторого момента времени  $t_k$ , контролирующего состояние этого объекта до перехода в предельное состояние в установленных условиях эксплуатации.

Оценками остаточного ресурса служат:

– средний остаточный ресурс  $\bar{T}(t_k)$ , определяемый как математическое ожидание остаточного ресурса после времени  $t_k$ ;

– гамма-процентный остаточный ресурс  $T_\gamma(t_k)$ , определяемый как наработка объекта, начиная с момента времени  $t_k$  до момента времени, в течение которого безотказно проработавший объект будет иметь значение условной вероятности безотказной работы равной  $\gamma$ .

Гамма-процентный остаточный ресурс определяется из уравнения

$$\gamma = P[(t_k + T_\gamma(t_k))/t_k], \quad (1)$$

где значение  $\gamma$  находится из условия допустимого риска количества отказов.

Используется следующая модель расходования ресурса:

$$\hat{T} = T_0 + 1/\hat{\lambda}_t, \quad (2)$$

где  $\hat{T}$  – оценка среднего ресурса;  $T_0$  – наработка до отказа изделия, берется из технической документации или на основе моделирования его физических свойств;  $\hat{\lambda}_t$  – оценка интенсивности отказов для изделий, сохранивших работоспособность после времени  $t_k$ .

Расчет проводится по схеме усеченной выборки невозстанавливаемых изделий.

Алгоритм расчета состоит в следующем.

1. Определяется вероятность безотказной работы  $P(t_k)$  на момент контроля состояния оборудования  $t_k$  по эксплуатационным данным:  $P(t_k) = (N - m)/N$ , где  $N$  – число наблюдаемых изделий;  $m$  – число отказавших изделий.

2. Вычисляется средняя интенсивность отказов  $\bar{\lambda}$  за период времени  $(t_k - T_0)$

$$\bar{\lambda} = \frac{m}{\bar{N}(t_k - T_0)}, \quad (3)$$

где  $\bar{N}$  – среднее число изделий, исправно работающих в интервале  $(t_k - T_0)$ ;

$$\bar{N} = \frac{1}{2}(N + (N - m)).$$

3. Определяется среднее квадратическое отклонение интенсивности отказов

$$\sigma_{\bar{\lambda}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{l - 1}}, \quad (4)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов, вычисленная для наработки  $t_i$ ;  $l$  – число интервалов наработок изделия при контроле его состояния. При малом числе отказов ( $m < 10$ ) можно принять  $\sigma_{\bar{\lambda}} \approx \bar{\lambda}$ .

4. Интервальная оценка интенсивности отказов определяется из следующей формулы:

$$\psi = P\left(\bar{\lambda} - t_{\gamma}\sigma_{\bar{\lambda}}/\sqrt{m} < \lambda < \bar{\lambda} + t_{\gamma}\sigma_{\bar{\lambda}}/\sqrt{m}\right), \quad (5)$$

где  $\psi$  – доверительная вероятность, ее значение принимаем ранее установленному по формуле (1);  $t_{\gamma}$  – квантиль распределения Стьюдента с числом степеней свободы  $k = m - 1$ .

5. Нижняя и верхняя оценки среднего ресурса с учетом формулы (2) определяются из соотношений:

$$\hat{T}_{\min} = T_0 + \frac{1}{\bar{\lambda} + t_{\gamma}\sigma_{\bar{\lambda}}/\sqrt{m}}; \quad \hat{T}_{\max} = T_0 + \frac{1}{\bar{\lambda} - t_{\gamma}\sigma_{\bar{\lambda}}/\sqrt{m}}. \quad (6)$$

6. Оценка показателей остаточного ресурса может быть определена из соотношений:

$$\begin{aligned} \hat{T}(t_k) &\geq (\hat{T} - t_k) / \hat{P}(t_k); \\ \hat{T}_{\gamma}(t_k) &\geq \hat{T}_{\gamma} - t_k, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\hat{T}(t_k)$ ,  $\hat{T}_{\gamma}(t_k)$  – оценки среднего и гамма-процентного остаточного ресурса соответственно;  $\hat{T}$ ,  $\hat{T}_{\gamma}$  – оценки среднего и гамма-процентного ресурса;  $\hat{P}(t_k)$  – оценка вероятности безотказной работы за время  $t_k$ .

Если отказов нет, то принимается

$$\hat{T}(t_k) \geq \hat{T}_{\min} - t_k. \quad (8)$$

По результатам эксплуатационных наблюдений было проведено обследование турбокомпрессорных установок К-350 и получены следующие исходные данные для расчета: число наблюдаемых машин  $N = 8$ ; принято, что ресурс турбокомпрессоров определяется базовой деталью – ресурсом ротора. Отказы ротора обусловлены комбинацией простых отказов: износа, коррозионного разрушения, повышения нагрузок и т.д. Нарботка до отказа ротора  $T_0 = 47,6$  тыс. ч; число отказавших машин (по базовой детали – ротору)  $m = 5$ . Получены наработки компрессоров при контроле их состояния соответственно для компрессора № 1 – 168,9 тыс. ч, компрессора № 2 – 137,5 тыс. ч. Принята доверительная вероятность  $\psi = 0,95$ .

В результате проведенных расчетов были получены оценки среднего ресурса и среднего остаточного ресурса соответственно для компрессора № 1 – 181,6 тыс. ч и 30 тыс. ч; для компрессора № 2 – 145,5 тыс. ч и 22 тыс. ч.

Таким образом, приведенная методика позволяет получить оценки остаточного ресурса индивидуально для каждого изделия. Точность оценок определяется заданной доверительной вероятностью  $\psi$ .

#### *Список литературы*

1. Надежность и эффективность в технике : справочник. В 10 т. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания / под ред. Р.С. Судакова и О.И. Тескина. – М. : Машиностроение, 1989. – 376 с.

2. Лейфер, Л.А. Методы прогнозирования остаточного ресурса машин и их программное обеспечение / Л.А. Лейфер. – М. : Знание, 1988. – 60 с.

3. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.

---

## Residual Life Estimation for Technical Equipment in Single Implementation

V.I. Lukyanenko<sup>1</sup>, N.V. Vorobyova<sup>1</sup>, Yu.V. Vorobyov<sup>2</sup>

*Departments: "Higher Mathematics",  
Moscow State Engineering University (MSEU), Moscow (1); Ver\_Luk@mail.ru;  
"Theory of Machines, Mechanisms and Machine Parts", TSTU (2)*

**Key words and phrases:** failure rate; gamma-percent level of residual life; interval estimation; model of resource consumption; residual life.

**Abstract:** The paper considers a model of resource spending. Using the truncated sample scheme we specified the actual failure rate of equipment under specific operating conditions. The estimates of mean and gamma-percent levels of residual life have been proposed.

---

## Einschätzung der restlichen Ressource der technischen Ausrüstung in der einzelnen Erfüllung

**Zusammenfassung:** Es ist das Modell des Verbrauches der Ressource betrachtet. Nach dem Schema des abgestumpften Abrufes ist die tatsächliche Ausfallrate der Ausrüstung bei den konkreten Bedingungen seiner Ausnutzung präzisiert. Es sind die Einschätzungen der mittleren und gamma-prozentigen restlichen Ressource angeboten.

---

## Estimation de la ressource restante de l'équipement technique dans une réalisation unitaire

**Résumé:** Est envisagé le modèle de la dépense de la ressource. D'après le schéma du choix restreint est précisée l'intensité réelle des défaillances de l'équipement lors des conditions concrètes de son exploitation. Sont proposées les estimations de la ressource restante moyenne et gamma de pourcentage.

---

**Авторы:** *Лукьяненко Вера Ивановна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика»; *Воробьева Нина Валентиновна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)» г. Москва; *Воробьев Юрий Валентинович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Кормильцин Геннадий Сергеевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».