

Научная статья
УДК 621.052.08

Методический подход к оцениванию и прогнозированию остаточного ресурса специальных технических систем космического ракетного комплекса

Дмитрий Николаевич Гула, Дамир Расимович Абсалямов, Виктор Михайлович Моторин

Аннотация. В статье представлен методический подход к оцениванию и прогнозированию остаточного ресурса технических систем включающий непараметрические методы оценивания остаточного ресурса по цензурированным выборкам специальных технических систем, входящих в состав технологического оборудования космического ракетного комплекса по результатам эксплуатационных наблюдений при многократно цензурированных выборках, т.е. при которых имеются только полные или неполные наработки до отказа. Изложен теоретический подход, позволяющий оценивать показатели надежности по цензурированным выборкам и прогнозирования остаточного ресурса технических систем космического ракетного комплекса.

Ключевые слова: прогноз остаточного ресурса; специальные технические системы; цензурированные выборки

Для цитирования: Гула Д.Н., Абсалямов Д.Р., Моторин В.М. Методический подход к оцениванию и прогнозированию остаточного ресурса специальных технических систем космического ракетного комплекса // Вооружение и экономика. 2024. №2(68). С. 51-57.

Original article

A Methodological Approach to Residual Life Assessment and Prediction of the Space Rocket Complex Special Technical Systems

Dmitrii N. Gula, Damir R. Absaliyev, Viktor M. Motorin

Abstract. The article presents a methodical approach to estimating and forecasting the residual life of technical systems, including non-parametric methods of estimating the residual life of censored samples of special technical systems, which are part of the technological equipment of space rocket complex, based on the results of operational observations with repeatedly censored samples, i.e. when there are only complete or incomplete operating time to failure. A theoretical approach is outlined, which allows estimating reliability indices by censored samples and predicting the residual life of technical systems of the space rocket complex.

Keywords: residual life prediction; special technical systems; censored samples

For citation: Gula D.N., Absaliyev D.R., Motorin V.M. A Methodological Approach to Residual Life Assessment and Prediction of the Space Rocket Complex Special Technical Systems // Armament and Economics. 2024. No.2(68). P. 51-57.

Для создания и поддержания условий нормального функционирования технологического оборудования (ТО) космического ракетного комплекса (КРК) предназначены технические системы (ТС)¹, включающие в себя системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, холодоснабжения, водоснабжения и водоотведения, системы дистанционного и автоматического управления.

ТС работают по жесткому технологическому графику, а сроки их эксплуатации значительно превосходят назначенный ресурс. Снижение надежности значительной части оборудования обусловлено деградационными процессами, к которым относятся, прежде всего, механический износ в кинематических парах, коррозия, снижение упругости и эластичности прокладок, отложения в трубопроводах (рисунок 1) [1].

При этом ТС различных конструктивных элементов, входящих в состав каждого агрегата, как правило, изменяются неравномерно, в результате чего наступает момент, когда объект переходит в неработоспособное состояние или предельное состояние (рисунок 2).

¹ ГОСТ 53802-2010 Системы и комплексы космические. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 34 с.



Рисунок 1 – Статистические данные по отказам технических систем

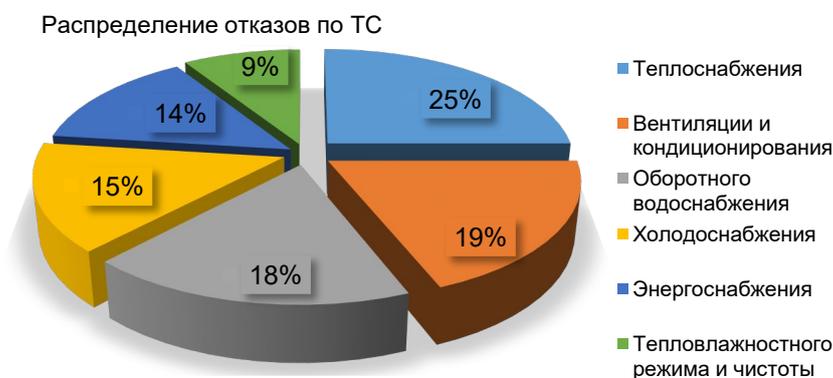


Рисунок 2 – Доля постепенных и внезапных отказов технических систем

Для решения проблемы оценивания и прогнозирования остаточного ресурса (ОР) необходимо внедрение новых методических подходов, позволяющих получить показатели фактического состояния ТС и ОР ТС [2; 3].

Таким образом, используется непараметрическое оценивание показателей надежности, позволяющее при неизвестном виде закона распределения наработки до отказа получить непосредственную оценку показателей надежности по выборочным данным о наработках.

Исходными данными являются:

t_1, t_2, \dots, t_r – значения наработки до отказа;

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ – значения наработки до цензурирования;

r – число наработок до отказа;

n – число наработок до цензурирования;

$N = r + n$ – объем выборки.

Выходными данными является:

$\tilde{F}(t)$ – эмпирическая функция распределения наработки до отказа.

Применительно к ТС КРК предлагаемый подход является актуальным. Объясняется это тем, что взаимосвязанные между собой системы вентиляции и кондиционирования, технического и обратного водоснабжения, холодоснабжения, а также средства их местного, дистанционного и автоматического управления представляют собой сложный комплекс, требующий разработки системных научных основ оценивания и прогнозирования ОР.

Показателями ТС при оценивании и прогнозировании ОР являются:

точечная оценка вероятности безотказной работы за наработку – $t_0 \tilde{P}(t_0)$;

точечная оценка средней наработки до отказа – \bar{t} ;

точечная оценка гамма-процентной наработки до отказа – t_γ ;

приближенные значения доверительных границ вероятности безотказной работы для доверительной вероятности $-\gamma$;
 интервальные оценки средней наработки до отказа в виде нижней $-\underline{T}$ и верхней $-\bar{T}$ доверительных границ;
 интервальные оценки гамма-процентной наработки до отказа в виде нижней \underline{t}_γ и \bar{t}_γ верхней доверительных границ.

Показатели ОР специальных технических систем (СТС) КРК:

точечная оценка среднего ОР $\bar{t}(\tau)$ и интервальная оценка среднего ОР в виде нижней доверительной границы $\underline{T}(\tau)$;

точечная оценка гамма-процентного ОР $t_\gamma(\tau)$ и интервальная оценка гамма-процентного ОР в виде нижней доверительной границы $\underline{t}_\gamma(\tau)$.

При анализе статистики отказов СТС часто возникает ситуация, когда часть подконтрольных объектов СТС отказала в известный момент или в интервале времени, а часть объектов еще не отказала либо исключена из наблюдения по причинам, не связанным с их отказом. Таким образом, относительно момента отказа можно указать только интервал наработки, внутри которого либо произошел, либо произойдет отказ изделия, а точное значение наработки до отказа неизвестно. Процесс возникновения неопределенности момента отказа объекта называется цензурированием. При этом интервал неопределенности известен исследователю [4].

Причинами цензурирования являются:

- одновременность начала и (или) окончания эксплуатации изделий;
- снятие с эксплуатации изделий по организационным причинам или из-за отказов составных частей, надежность которых не исследуется;
- перевод агрегатов (систем) КРК из одного режима применения в другой в процессе эксплуатации;
- необходимость оценивания надежности до наступления отказов всех эксплуатируемых изделий.

Оценка эмпирической функции распределения строится по цензурированным выборкам, элементами которой являются значения наработки до отказа и наработки до цензурирования либо только значения наработки до цензурирования.

Разработанная методика включает непараметрические методы оценивания ОР по цензурированным выборкам СТС, входящих в состав ТО КРК по результатам эксплуатационных наблюдений при многократно цензурированных справа выборках, т.е. при таких выборках, в которых имеются только полные или неполные наработки до отказа. Применение непараметрических методов обусловлено тем, что для подконтрольных элементов ТО неизвестны законы распределения наработки до отказа агрегатов (систем) КРК.

Оценивание показателей надежности производится в следующей последовательности.

Наработки до отказа и наработки до цензурирования выстраивают в вариационный ряд в порядке неубывания, если отдельные значения наработки до отказа равны некоторым значениям наработки до цензурирования, то в вариационном ряду сначала указывают наработки до отказа, а затем наработки до цензурирования.

По построенному вариационному ряду определяют число интервалов наблюдения m . Для каждого интервала подсчитывают число наработок до отказа $r_i, i = 1, 2, \dots, m$, и число наработок до цензурирования n_{i-1} , лежащих между $(i-1)$ -м и i -м интервалами наблюдения. Совокупность этих значений должна удовлетворять условиям:

$$\sum_{i=1}^m r_i = r, \sum_{i=1}^m n_i = n.$$

Смысл схемы оценивания ОР по цензурированным выборкам СТС заключается в том, что на каждом i -м интервале наблюдения после прекращения наблюдения за n_{i-1} неотказавшими изделиями в конце $(i-1)$ -го интервала наблюдения оставшиеся N_{yi} неотказавшие изделия рассматриваются как полная выборка изделий, поставленных

на испытания по плану $[N_{yi}U_{ti}]$ и имеющих одинаковую условную вероятность отказа на i -м интервале – вероятность того, что изделие откажет на i -м интервале при условии того, что на всех предшествующих интервалах оно не отказало:

$$\left(t_{i-1}, \frac{t_i}{t_{i-1}}\right) = \frac{F(t_i) - F(t_{i-1})}{1 - F(t_i)}. \quad (1)$$

Для каждого i -го интервала наблюдений вычисляется величина эквивалентного объема цензурированной выборки:

$$N_{\exists(i+1)} = N_{\exists i} \left[1 - \frac{n_i}{N - \sum_{j=0}^{i-1} n_j - \sum_{j=1}^i r_j} \right] = N_{\exists i} - \frac{n_i}{1 - \tilde{F}(t_{i-1})}, \quad (2)$$

где $N_{\exists i} = \frac{N_{yi}}{\tilde{F}(t_{i-1})}$, N_{yi} – условный объем цензурированной выборки на интервале i -го наблюдения, этот объем численно равен числу изделий агрегатов (систем) КРК, за которым ведется наблюдение на i -м интервале; $\tilde{F}(t_{i-1})$ – оценка эмпирической функции распределения в конце $(i - 1)$ -го интервала наблюдения.

В частности, первому интервалу наблюдения соответствует эквивалентный объем цензурированной выборки $N_{\exists 1} = N - n_0$.

Эмпирическая функция распределения, соответствующая каждой наработке до отказа в исходном вариационном ряду, может быть найдена по формулам:

$$\tilde{F}(t_l) = \frac{l - n_0}{N_{\exists 1}}, \quad (3)$$

если l -я наработка принадлежит первому интервалу наблюдения;

$$\tilde{F}(t_l) = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{r_j}{N_{\exists j}} + \frac{l - \sum_{j=0}^{i-1} n_j - \sum_{j=1}^{i-1} r_j}{N_{\exists i}}, \quad (4)$$

если l -я наработка принадлежит i -му интервалу наблюдения, $i = 2, 3, \dots, m$.

Оценивание технического состояния СТС КРК.

Показателями ТС являются точечная оценка вероятности безотказной работы за наработку $t_0 \tilde{P}(t_0)$, точечная оценка средней наработки до отказа, точечная оценка гамма-процентной наработки до отказа, нижняя и верхняя доверительные границы средней наработки до отказа, нижняя и верхняя доверительные границы γ -процентной наработки до отказа [5].

Точечная оценка вероятности безотказной работы агрегатов (систем) КРК:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(t_0) &= 1 - [d_1 \tilde{F}(t_l) + (1 - d_1) \tilde{F}(t_{l-1})], \\ d_1 &= \frac{t_0 - t_{l-1}}{t_l - t_{l-1}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где t_{l-1}, t_l – наработки до отказа, между которыми лежит наработка t_0 .

Точечная оценка средней наработки до отказа агрегатов (систем) КРК:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^r t_i [\Delta F(t_i)] + [1 - F(t_r)] z_N, \quad (6)$$

где $z_N = \max(t_r, \tau_n)$; $\Delta F(t_i) = F(t_i) - F(t_{i-1})$.

Точечная оценка гамма-процентной наработки до отказа агрегатов (систем) КРК:

$$\begin{aligned} t_\gamma &= d_2 t_l + (1 - d_2) t_{l-1}, \\ d_2 &= \frac{1 - \gamma - \tilde{F}(t_{l-1})}{\tilde{F}(t_l) - \tilde{F}(t_{l-1})}, \end{aligned} \quad (7)$$

где t_{l-1}, t_l – наработки до отказа, для которых выполняется условие:

$$\tilde{F}(t_{l-1}) < 1 - \gamma < \tilde{F}(t_l).$$

Приближенные значения доверительных границ вероятности безотказной работы агрегатов (систем) КРК для доверительной вероятности вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \underline{P}(t_0) &= \tilde{P}(t_0) - \sigma_l U_\beta, \\ \overline{P}(t_0) &= \tilde{P}(t_0) + \sigma_l U_\beta, \\ \sigma_l &= P(t_{l-1}) \sqrt{\sum_{i=1}^j \frac{r_i}{(N-p_i)(N-q_i)}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где U_β – квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности β ; $\beta = \gamma$ при вычислении нижней (верхней) односторонней доверительной границы; $\beta = \frac{1+\gamma}{2}$ при вычислении нижней (верхней) двусторонней доверительной границы; j – номер интервала наблюдения, которому принадлежит $(l - 1)$ -й член вариационного ряда; $p_i = n_0 + \sum_{j=1}^{i-1} (n_j + r_j)$, $q_i = p_i + r_i$.

Нижняя доверительная граница средней наработки до отказа (для уровня q):

$$\underline{T} = \bar{t} - U_q \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{l=1}^r \Delta \tilde{F}(t_l) (t_l - \bar{t})^2}, \quad (9)$$

где $\Delta \tilde{F}(t_l) = \tilde{F}(t_l) - \tilde{F}(t_{l-1})$.

Верхняя доверительная граница средней наработки до отказа (для уровня q):

$$\overline{T} = \bar{t} + U_q \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{l=1}^r \Delta \tilde{F}(t_l) (t_l - \bar{t})^2}. \quad (10)$$

Нижняя доверительная граница γ -процентной наработки до отказа:

$$\underline{t}_\gamma = d'_1 t_l + (1 - d'_1) t_{l-1}, \quad (11)$$

где $l = \overline{1, r}$; $t_0 = 0$; $\overline{F}(t_{l-1}) \leq 1 - \gamma \leq \overline{F}(t_l)$; $d'_1 = \frac{1 - \gamma - \overline{F}(t_{l-1})}{\overline{F}(t_l) - \overline{F}(t_{l-1})}$.

Верхняя доверительная граница γ -процентной наработки до отказа:

$$\overline{t}_\gamma = d''_1 t_l + (1 - d''_1) t_{l-1}, \quad (12)$$

где $l = \overline{1, r}$; $t_0 = 0$; $\underline{F}(t_{l-1}) \leq 1 - \gamma \leq \underline{F}(t_l)$; $d''_1 = \frac{1 - \gamma - \underline{F}(t_{l-1})}{\underline{F}(t_l) - \underline{F}(t_{l-1})}$.

Оценивание ОР СТС КРК.

Под остаточным (после времени τ) ресурсом объекта понимается его наработка, начиная с момента τ до перехода в предельное состояние при установленных режимах применения и условиях эксплуатации.

Если ξ – наработка объекта от начала эксплуатации до перехода его в предельное состояние, то ОР ξ_τ после времени τ равен $\xi_\tau = \xi - \tau$, где $\xi \geq \tau$.

Поскольку ξ_τ является случайной величиной, то ОР можно описывать её числовыми характеристиками.

В качестве основных характеристик ОР СТС КРК приняты следующие:

средний ОР $\bar{t}(\tau)$;

гамма-процентный ОР $\underline{t}_\gamma(\tau)$, определяемый как наработка, начинающаяся с некоторого момента времени τ , в течение которого безотказно проработавший объект будет иметь значение условной вероятности безотказной работы $\frac{P[\tau + \underline{t}_\gamma(\tau)]}{P(\tau)}$, равное γ .

Поскольку $P_\tau(t) = \frac{P(\tau+1)}{P(\tau)}$ – условная вероятность безотказной работы агрегатов (систем) КРК на интервале наблюдения $[\tau + 1]$, тогда:

$$\bar{t}(\tau) = \int_0^\infty P_\tau(t) dt,$$

или

$$\bar{t}(\tau) = \frac{1}{P(\tau)} \int_\tau^\infty P(t) dt,$$

а $t_\gamma(\tau)$ – есть корень уравнения $P_\tau(t) = \gamma$ относительно t ($t = t_\gamma(\tau)$) при заданном значении γ .

Средний ОР работы агрегатов (систем) КРК $\bar{t}(\tau)$ вычисляется по формуле:

$$\bar{t}(\tau) = \frac{\sum_{i=k+1}^N z_i}{K_N(\tau)(N-K)}, \tag{13}$$

где $z_i = t_i - \tau$; $K_N(\tau) = 1 - [\hat{P}(\tau)]^N$; k – число отказавших объектов на интервале $(0, \tau)$; $\hat{P}(\tau) = 1 - \frac{k}{N}$.

Нижняя доверительная граница среднего ОР СТС КРК:

$$\underline{T}(\tau) = \frac{1}{r} [\sum_{i=1}^{\rho} z_i + (r - \rho)t] - \frac{t}{2} \sqrt{\frac{q}{r(1-q)}} \text{ при } r < 30, \tag{14}$$

где t – продолжительность наблюдения после τ ; r и ρ – число объектов на интервале $[\tau, \tau + t]$, соответственно наблюдаемых и отказавших.

Гамма-процентный ОР работы агрегатов (систем) КРК $t_\gamma(\tau)$:

$$t_\gamma(\tau) = z_{m-1} + \frac{(z_{(m)} - z_{(m-1)})[\hat{P}_\tau(z_{(m-1)}) - \gamma]}{\hat{P}_\tau(z_{(m-1)}) - \hat{P}_\tau(z_{(m)})}, \tag{15}$$

где $z_{(1)} < z_{(2)} < \dots < z_{(m-1)} < z_{(m)}$ – вариационный ряд остаточных наработок; $z_{(m-1)}, z_{(m)}$ – остаточные наработки, для которых выполнено условие $\hat{P}_\tau(z_{(m)}) \leq \gamma < \hat{P}_\tau(z_{(m-1)})$; $\hat{P}_\tau(t) = \frac{\hat{P}(\tau+t)}{\hat{P}(\tau)}$.

Нижняя доверительная граница гамма-процентного ОР работы агрегатов (систем) КРК вычисляется по формуле:

$$\underline{t}_\gamma(\tau) = \frac{t_\gamma(\tau)}{1 + U_q \varphi(\gamma, r)}, \tag{16}$$

где U_q – квантиль стандартизованного нормального закона; $\varphi(\gamma, r) = \frac{1}{\ln \frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{1-\gamma}{r}}$.

Алгоритм оценивания ОР СТС, входящих в состав технологического оборудования КРК по цензурированным выборкам:

1. Задаемся исходными данными, которыми являются значения наработки до отказа, значения наработки до цензурирования, число наработок до отказа, число наработок до цензурирования, объем выборки.

2. Формируем вариационный ряд из значений наработок до отказа и наработок до цензурирования. По построенному вариационному ряду определяем число интервалов наблюдения m . Для каждого интервала наблюдения подсчитываем число наработок до отказа r_i и число наработок до цензурирования n_{i-1} , лежащих между $(i - 1)$ -м и i -м интервалами наблюдения.

3. Определяем оценку эмпирической функции распределения наработки до отказа $\tilde{F}(t)$ с помощью формул (2)-(4).

4. По формулам (5)-(8) на основе полученной оценки эмпирической функции распределения определяем точечные оценки вероятности безотказной работы за наработку $t_0 - \tilde{P}(t_0)$, средней наработки до отказа \bar{t} , гамма-процентной наработки до отказа t_γ , а также приближенные значения доверительных границ вероятности безотказной работы для доверительной вероятности $\gamma - \underline{P}(t_0)$ и $\bar{P}(t_0)$.

5. Определяем доверительные границы вероятностей отказа в моменты t_l - $\bar{F}(t_l)$ и $\underline{F}(t_l)$. По формулам (9)-(12) определяем интервальные оценки средней наработки до отказа в виде нижней \underline{T} и верхней \bar{T} доверительных границ и интервальные оценки гамма-процентной наработки до отказа в виде нижней \underline{t}_γ и верхней \bar{t}_γ доверительных границ.

6. По формулам (13)-(16) определяем показатели ОР: точечную оценку среднего ОР $\bar{\tau}$ и интервальную оценку среднего ОР в виде нижней доверительной границы $\underline{T}(\tau)$; точечную оценку гамма-процентного ОР $t_\gamma(\tau)$ и интервальную оценку гамма-процентного ОР в виде нижней доверительной границы $\underline{t}_\gamma(\tau)$.

7. На основе анализа полученных оценок показателей надежности делаем заключение о ТС и об ОР элементов ТО СТС, входящих в состав ТО КРК.

Предложенный методический подход к оцениванию и прогнозированию ОР СТС КРК и новый теоретический подход, использующий непараметрическое оценивание показателей надежности, позволит при неизвестном виде закона распределения наработки до отказа получить непосредственную оценку показателей надежности по выборочным данным о наработках.

Список источников

1. Аникейчик Н.Д., Антропов О.А., Баранов Л.Т. и др. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. Т.1: Объекты космической инфраструктуры: монография. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 400 с.
2. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин. М.: Колос, 1976. 288 с.
3. Гула Д.Н., Головчинский В.О. Прогнозирование технического состояния сложных технических комплексов на основе экспертной информации // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2021. №3. С. 260-264.
4. Бирюков Г.П., Зброжек Ю.М. Эксплуатация стартовых комплексов по фактическому состоянию. М.: МАТИ им. К.Э. Циолковского, 2000. 172 с.
5. Чекардовский С.М., Чекардовская И.А., Илюхин К.Н., Миронов В.В., Чекардовский М.Н. Методы и способы комплексных исследований и оценки технического состояния оборудования инженерных систем: монография. М.: Русайнс, 2021. 284 с.

Информация об авторах

Д.Н. Гула – кандидат технических наук;
Д.Р. Абсалямов – доктор технических наук, доцент;
В.М. Моторин – кандидат технических наук, доцент.