

## **ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ ОЦЕНОК ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ РЭС ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗРК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОДЛЕНИЯ НАЗНАЧЕННЫХ СРОКОВ СЛУЖБЫ (РЕСУРСОВ)**

Б.Н. Ланецкий, В.В. Кобзев  
(Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

*На основе результатов исследований влияния погрешностей оценок показателей безотказности на выбор моментов проведения контролей предельного состояния изделий обосновываются требования к точности этих оценок.*

*показатели безотказности РЭС, точность оценок*

**Постановка проблемы.** Эффективность технической эксплуатации РЭС ЗРС, как и любых изделий военного назначения, в значительной мере определяется своевременным обнаружением их переходов в предельные состояния (ПС) и последующим ремонтом. Применение регламентированной стратегии ремонта предполагает проведение ремонта по истечению назначенного срока службы (н.ср.сл.) (израсходованию назначенного ресурса (н.р.)), что приводит к значительному недоиспользованию ресурсов большого количества функциональных узлов, агрегатов и других объектов ремонта. Для выявления потребностей конкретных РЭС и их составных частей в ремонте необходимо проведение контролей их ПС. Контроль ПС предусматривает определение принадлежности фактического состояния РЭС в данный момент времени непредельному состоянию с уточнением их н.ср.сл. (р.), либо одному из видов ПС, в соответствии с выбранным критерием ПС. При этом ремонт изделий производится по результатам их эксплуатации и контролей ПС.

Проведение контроля ПС РЭС эксплуатируемых ЗРК требует определенных стоимостных, трудовых и временных затрат. Эффективность проведения контролей ПС в значительной мере определяется своевременностью их проведения. При наличии отработанной системы контроля за техническим состоянием РЭС эксплуатируемого ЗРК, совершенной системы сбора и обработки информации о надежности момент проведения контроля ПС РЭС целесообразно определять по результатам прогнозирования ПС.

Как правило, при контроле ПС находятся оценки суммарных стоимостей выполненных ТО и текущих ремонтов, оценивается стоимость предстоящего ремонта, и, при необходимости, с использованием построенной модели изменения безотказности, стоимости ТО и текущих ремонтов на продлеваемом интервале эксплуатации. При этом прогнозируемые характеристики надежности и стоимости технической эксплуатации изделий определяются с определенной точностью, что должно учитываться при определении моментов проведения контролей ПС.

В связи с этим актуальной является задача исследования влияния точности определения характеристик безотказности РЭС эксплуатируемых ЗРК на выбор моментов проведения их контролей ПС для обоснования соответствующих требований.

**Анализ литературы.** В научно–технической литературе решению задач определения оптимальных периодичностей проведения контролей ПС и, тем более, исследованию влияния на них точностей определения характеристик безотказности до настоящего времени уделено недостаточно внимания. Больше развитие получили задачи оптимизации периодичности проведения “полных восстановлений” (ПВ) и “профилактических обслуживаний” [1 – 5] по критерию максимума коэффициента готовности или минимума средних удельных затрат. При этом характеристики надежности изделий, как правило, считаются вероятностно определенными (известны функции распределения и их параметры). На практике же они известны частично (например: известна функция распределения, а ее параметры неизвестны; теоретическая функция распределения неизвестна, а ее параметры заданы неточно и т.д.). В этих условиях задачи оптимизации периодичности ПВ можно считать “вероятностно неопределенными” [6]. Вопросам исследования влияния точности оценки характеристик безотказности на выбор момента проведения ПВ до настоящего времени уделено недостаточное внимание.

Приведенные обстоятельства позволяют сделать вывод о целесообразности развития рассмотренных подходов с целью исследования влияния точности оценки показателей безотказности на выбор момента проведения контроля ПС РЭС эксплуатируемых ЗРК.

**Цель статьи.** Исследовать влияние точности оценки показателей безотказности РЭС эксплуатируемых ЗРК на величину функции удельных “эксплуатационных” затрат и тем самым на выбор момента проведения контроля ПС, а также разработать рекомендации по их обоснованию.

**Постановка задачи.** В соответствии с изложенным выше назначением контроля ПС будем считать, что в момент  $t$  проводится контроль ПС РЭС эксплуатируемого ЗРК, по результатам которого проводится

ремонт – немедленно или по истечении уточненного н.ср.сл. (израсходовании уточненного н.р.)  $r(\tau)$ . Отказы, обнаруженные до момента  $\tau$  устраняются текущим ремонтом. По величине восстановленного ресурса РЭС эксплуатируемого ЗРК текущий ремонт будем рассматривать как МВ, а ремонт, проводимый по результатам контролей ПС, как ПВ. Средние затраты на проведение ПВ составляют  $C_p$ , МВ –  $C_m$ , контролея ПС –  $C_{кпс}$ . При известной функции распределения наработки РЭС эксплуатируемого ЗРК до отказа  $F(t)$  среднее число МВ на интервале эксплуатации  $[0, \tau]$  составит  $\Lambda(\tau) = \int_0^{\tau} \lambda(t) dt$ , где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов объекта [1].

Тогда средние удельные затраты на цикл «эксплуатация – ремонт» можно определить по соотношению

$$R(\tau) = \frac{C_p + C_m \Lambda(\tau + r(\tau)) + C_{кпс}}{\tau + r(\tau)}. \quad (1)$$

Ниже для упрощения изложения будем полагать, что контроль ПС РЭС эксплуатируемых ЗРК проводится своевременно (т.е. перед наступлением ПС), по результатам которого осуществляется ремонт. При этом момент проведения контроля ПС практически совпадает с моментом проведения ремонта. В этом случае можно считать, что  $C_p + C_{кпс} = C_v$  и  $r(\tau) = 0$ . Тогда соотношение (1) преобразуется к известному в [1, 5] виду

$$R(\tau) = \frac{C_v + C_m \Lambda(\tau)}{\tau}. \quad (2)$$

Полагается известной функция распределения  $F(t)$ . Значения параметров этой функции статистически оцениваются по выборке эксплуатационных наблюдений ограниченного объема, вследствие чего они имеют ограниченную точность, что при определении оптимального момента  $\tau$  для конкретного РЭС эксплуатируемого ЗРК, может приводить к ошибкам. Оптимальный период  $\tau_0$  проведения контроля ПС РЭС эксплуатируемого ЗРК и последующего ремонта вычисляется по критерию минимума функции  $R(\tau)$ .

Исследуем зависимость отклонения величины функции  $R(\tau)$  относительно оптимального значения  $R(\tau_0)$  от величин относительных ошибок характеристик безотказности. При этом требования к максимально допустимой величине этих ошибок будут определяться в зависимости от

величины максимально допустимого отклонения средних удельных затрат за цикл «эксплуатация – ремонт» от своего оптимального значения.

**Решение задачи.** Задачу исследования влияния точности оценки показателей безотказности на выбор момента проведения контроля ПС РЭС эксплуатируемого ЗРК можно свести к решению следующих подзадач:

1) исследование устойчивости функции средних удельных эксплуатационных затрат и определение диапазона допустимого отклонения периода  $\tau$  в зоне значений, близких к оптимальным. При этом в качестве нормированного изменения удельных эксплуатационных затрат (по сравнению с их минимальным значением), в пределах которого математическую модель можно считать устойчивой к изменению периода  $\tau$ , обычно принимается [6] 2...5%;

2) исследование чувствительности функции удельных эксплуатационных затрат к изменению ее исходных параметров и разработка рекомендаций по обоснованию (для известного диапазона допустимого отклонения периода  $\tau$ ) точности оценки этих параметров, т.е. показателей безотказности.

**Решение подзадачи 1.** В соответствии с [1], оптимальный период  $\tau_0$  проведения ПВ, а при сформулированных выше допущениях – контроля ПС РЭС эксплуатируемого ЗРК, в случае представления функции средних удельных эксплуатационных затрат в виде соотношения (2) является решением уравнения

$$\tau\lambda(\tau) - \Lambda(\tau) = \frac{C_v}{C_m}. \quad (3)$$

В случае монотонного возрастания величины  $\lambda(t)$  существует однозначное решение уравнения (3)  $\tau_0$ , которое после подстановки позволит записать (2) как  $R(\tau_0) = C_m\lambda(\tau_0)$ .

Допустим, что наработка РЭС эксплуатируемого ЗРК до отказа подчинена распределению Вейбулла, т.е.  $F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right)$ ,  $t \geq 0, b > 1$  [1]. Тогда  $\lambda(t) = \frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$ ,  $\Lambda(\tau) = \left(\frac{\tau}{a}\right)^b$ , средняя наработка до отказа  $T_{cp} = a\Gamma\left(1 + b^{-1}\right)$  или  $T_{cp} = aK_b$ , где  $K_b = \Gamma\left(1 + b^{-1}\right)$  — значение гамма-функции. Уравнение (3) при этом однозначно разрешается в виде

$$\tau_0 = a\left(\frac{C_v}{C_m(b-1)}\right)^{\frac{1}{b}}.$$

Минимальная величина средних удельных затрат определяется как

$$R(\tau_0) = \frac{b}{a} C_m \left( \frac{C_v}{C_m(b-1)} \right)^{\frac{b-1}{b}}.$$

Введем новую переменную  $y$ , под которой будем понимать относительные средние удельные затраты

$$y = \frac{R(\tau)}{C_m / T_{cp}} = \frac{C_v}{C_m} \frac{T_{cp}}{\tau} + K_b^b \left( \frac{\tau}{T_{cp}} \right)^{b-1}. \quad (4)$$

Обозначим  $x = \tau / T_{cp}$  – относительный период между полными восстановлениями,  $C = C_v / C_m$  – отношение средних стоимостей восстановления (коэффициент стоимости). С учетом введенных обозначений выражение (4) имеет вид

$$y = \frac{C}{x} + K_b^b x^{b-1}. \quad (5)$$

Дифференцируя выражение (5) по  $x$  и приравнявая производную нулю определим соотношения для оптимального относительного периода  $x_0$  и оптимального периода  $\tau_0$  между полными восстановлениями:

$$x_0 = K_b^{-1} \left( \frac{C}{b-1} \right)^{\frac{1}{b}}; \quad \tau_0 = T_{cp} x_0 = T_{cp} K_b^{-1} \left( \frac{C}{b-1} \right)^{\frac{1}{b}}.$$

Величина оптимальных относительных средних удельных затрат  $y_0$  определяется как

$$y_0 = \frac{R(\tau_0)}{C_m / T_{cp}} = \frac{b}{a} \frac{C_m \left( \frac{C_v}{C_m(b-1)} \right)^{\frac{b-1}{b}}}{C_m / T_{cp}} = b K_b^b x_0^{b-1}. \quad (6)$$

Для дальнейшего изложения введем новые относительные величины:  $\delta y = \frac{y - y_0}{y_0} = \frac{\Delta y}{y_0}$  – относительная погрешность изменения относительных средних удельных затрат;  $x_\varepsilon = \frac{x}{x_0}$  – относительное отклонение периода  $\tau$ .

Используя выражения (5) и (6) запишем  $\delta y = \frac{C + K_b^b x^b}{x b K_b^b x_0^{b-1}} - 1$  и, с учетом введенной величины  $x_\varepsilon$ , это соотношение может быть записано в виде

$$\delta y = \frac{b-1+x_{\varepsilon}^b}{bx_{\varepsilon}} - 1. \quad (7)$$

Графики зависимости  $\delta y = f(x_{\varepsilon})$  при различных значениях параметра формы  $b > 1$  приведены на рис. 1.

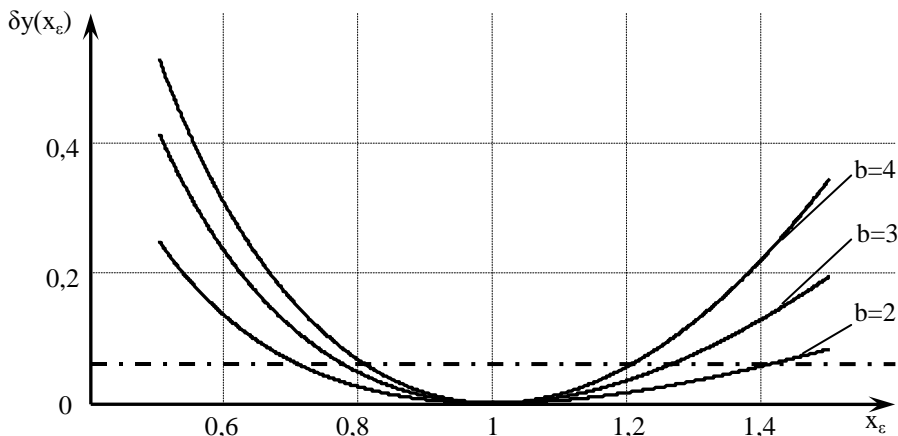


Рис. 1. Графики зависимости  $\delta y = f(x_{\varepsilon})$

Из рисунка видно (штрихпунктирная линия), что при погрешности удельных затрат, например 5% и  $b = 2$ , допустимое отклонение момента проведения контроля ПС находится в пределах от  $x_{\varepsilon н} = 0,73$  до  $x_{\varepsilon в} = 1,371$ . В этом диапазоне любой момент проведения контроля ПС РЭС эксплуатируемых ЗРК будет практически оптимальным с приемлемой для практики точностью расчетов. С ростом параметра формы  $b$  распределения Вейбулла или уменьшением коэффициента вариации продолжительности безотказной работы устойчивость функции удельных затрат снижается. Так при  $\delta y = 0,05$  допустимы следующие относительные отклонения момента проведения контроля ПС РЭС эксплуатируемого ЗРК относительно его оптимального значения: при  $b = 3$   $x_{\varepsilon н} = 0,794$ ,  $x_{\varepsilon в} = 1,24$ ; при  $b = 4$   $x_{\varepsilon н} = 0,825$ ,  $x_{\varepsilon в} = 1,188$  и т.д. Оптимальный период  $\tau_0$  и допустимые его отклонения  $\tau_{0н}$ ,  $\tau_{0в}$  при этом определяются как  $\tau_0 = T_{ср}x_0$ ,  $\tau_{0н} = x_{\varepsilon н}\tau_0$ ,  $\tau_{0в} = x_{\varepsilon в}\tau_0$ .

Таким образом, полученное соотношение (7) можно использовать для исследования устойчивости средних удельных затрат. Задаваясь

значением  $\delta y$  можно определить соответствующие допустимые отклонения оптимальной периодичности  $\tau_0$ .

**Решение подзадачи 2.** На практике, ввиду ограниченной точности оценки показателей безотказности вычисление точных значений  $\tau_0$  трудновыполнимо. Поэтому решение подзадачи 2 сводится к исследованию функции  $\delta y = f(\delta T_{cp})$  при определенном в результате решения подзадачи 1 диапазоне  $x_\varepsilon \in [x_{\varepsilon n}, x_{\varepsilon b}]$ , где  $\delta T_{cp} = \frac{\Delta T}{T_{cp}}$  — относительная ошибка оценки величины  $T_{cp}$  ( $\Delta T$  — абсолютная погрешности).

Получим выражение для абсолютной погрешности изменения величины  $y$ :  $\Delta y = y(T_{cp} + \Delta T) - y_0(T_{cp})$ . Значения функции  $y$  в окрестности точки с координатами  $T_{cp}$ , т.е. значения  $y(T_{cp} + \Delta T)$ , могут быть рассчитаны с использованием разложения этой функции в ряд Тейлора  $n$ -го порядка. При решении данной задачи целесообразно ограничиться порядком  $n=2$ , т.к. слагаемыми больших порядков можно пренебречь ввиду их близости к нулю. Тогда можно записать

$$\Delta y = \frac{1}{x} \left[ \frac{\Delta T}{T_{cp}} [C + K_b^b (1-b)x^b] + \frac{1}{2} b K_b^b (b-1)x^b \left( \frac{\Delta T}{T_{cp}} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Используя соотношения (8) и (5) можно получить выражение для определения  $\delta y(\delta T_{cp})$ . Опуская промежуточные преобразования, запишем итоговое соотношение

$$\delta y(\delta T_{cp}) = \frac{1}{x_\varepsilon} \frac{b-1}{b} \left[ \delta T_{cp} (1-x_\varepsilon^b) + \frac{1}{2} b x_\varepsilon^b (\delta T_{cp})^2 \right]. \quad (9)$$

Соотношение (9) может быть использовано для задания требований к точности оценки величины  $T_{cp}$ . Задаваясь значением  $\delta y$  (при фиксированном значении параметра  $b$  и  $x_\varepsilon \in [x_{\varepsilon n}, x_{\varepsilon b}]$ ) можно определить величину относительной ошибки  $\delta T_{cp}$ , которая может быть принята в качестве допустимой точности определения.

Таким образом, процедура задания требований к точности оценки величины  $T_{cp}$  при известной величине параметра  $b$  предусматривает выполнение следующих операций. Для заданной величины  $|\delta y|$  и известного значения  $b$ , определяются допустимые значения  $x_{\varepsilon n}$  и  $x_{\varepsilon b}$ . Для каждого из этих значений осуществляется построение зависимости  $\delta y(\delta T_{cp})$  и выделение области значений  $\delta T_{cp}$ , удовлетворяющих требованиям к

ду. Выделенная область значений  $\delta T_{cp}$ , характеризуется тем, что при выполнении условия принадлежности ей  $\delta T_{cp}$ , любое выбранное значение момента  $\tau$  проведения контроля ПС РЭС эксплуатируемого ЗРК, при котором выполняется условие  $x_{\epsilon} \in [x_{\epsilon n}, x_{\epsilon b}]$ , обеспечивает выполнение требований к заданной величине погрешности  $\delta u$ . Зафиксированные таким образом требования к точности оценки показателей безотказности используются в дальнейшем в качестве исходной информации при обосновании объемов испытаний РЭС ЗРК на надежность.

**Выводы.** Предлагаемый подход к обоснованию точности оценок показателей безотказности РЭС эксплуатируемых ЗРК при выборе моментов проведения контролей предельного состояния, основанный на результатах исследования чувствительности функции средних удельных затрат, позволяет обосновывать допустимые величины относительных ошибок оценки соответствующих стоимостных характеристик и показателей безотказности РЭС эксплуатируемых ЗРК. Допустимая величина этих ошибок определяется в окрестности точки, соответствующей минимуму средних удельных затрат с учетом ограничений на максимально допустимое отклонение этих затрат от оптимального значения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1990. – Т.8: Эксплуатация и ремонт / Под ред. В.И. Кузнецова и Е.Ю. Барзиловича. – 320 с.
3. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.
4. Голиков В.Ф. О влиянии точности определения характеристик надежности на выбор периода профилактического обслуживания // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – М., 1986. – № 1. – С. 66-69.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности: Пер. с англ., под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Сов. радио, 1969. – 488 с.
6. Володарский В.А. Оптимизация периодичности периодических замен в условиях неопределенности исходной информации // Надежность и контроль качества. – М., 1984. – № 8. – С. 39-44.

Поступила 23.03.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.И. Карпенко,  
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.