

УДК 629.783:537.622

Поэтапное подтверждение надежности единичных космических аппаратов

Колобов Анатолий Юрьевич¹

praktik-2009@yandex.ru

Блинов Дмитрий Сергеевич²

dmitriyblinov@mail.ru

Дикун Евгений Владимирович^{1(*)}

dikunev@laspace.ru

¹ АО «НПО Лавочкина», Химки, Московская обл., Россия² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена методика поэтапного контроля вероятности безотказной работы (ВБР) единичных космических аппаратов (КА) на этапах наземной экспериментальной отработки (НЭО), летных испытаний (ЛИ) и эксплуатации. Методика позволяет по цензурированным выборкам, состоящим из 1–2 аппаратов, получить высокие оценки ВБР как точечные, так и нижние доверительные границы (НДГ). Методика апробирована с положительными результатами на конкретных типах единичных КА.

Ключевые слова: надежность, контроль, космический аппарат, вероятность безотказной работы, летные испытания

Введение. Проблема контроля надежности единичных КА всегда актуальна. В соответствии с нормативной документацией требования к ВБР должны подтверждаться на каждом этапе жизненного цикла КА. На НЭО и ЛИ возникают проблемы из-за недостаточности статистики, а при ЛИ — из-за цензурирования испытаний. Получить оценки ВБР, позволяющие подтвердить требования ТЗ, можно используя метод накопления информации.

Материалы и методы; результаты. Оценка ВБР на этапе НЭО. При НЭО недостаток статистики можно компенсировать использованием априорной информации в виде проектных оценок и оценок изделий-аналогов. Высокую эффективность показывает метод байесовского объединения информации [1]. При оценках ВБР при НЭО предлагается учитывать результаты контрольных испытаний: предварительных и приемо-сдаточных. Для каждого КА $n = 2$ и количество отказов $d = 0$. Если известны только некоторые числовые характеристики показателя надежности, например проектное значение ВБР (P_a) и результаты испытаний по биномиальной схеме — n и d , оценка ВБР определяется как

$$\hat{P} = (\alpha + n - d)(\alpha + \beta + n)^{-1}; \quad (1)$$

$$\sigma_P^2 = (\alpha + n - d)(\beta + d)/[(\alpha + \beta + n)^2(\alpha + \beta + n + 1)]. \quad (2)$$

При $d = 0$ для нахождения α и β решается уравнение, имеющее единственный действительный корень z_* :

$$z^3 + Az^2 + Bz + C = 0; \quad (3)$$

$$A = -\frac{2s(2P_a-1)}{P_a(1-P_a)}, B = -\frac{s(3s+2P_a-1)}{P_a(1-P_a)}, C = -\frac{2s^2}{P_a(1-P_a)}, s = n(1-P_a) - d;$$

$$\alpha = (z_* - n)P_a; \beta = (z_* - n)(1 - P_a). \quad (4)$$

Оценкой НДГ ВБР $\underline{P}_\gamma$ при доверительной вероятности γ будет

$$\underline{P}_\gamma \approx [1 - \gamma]^c, c = \frac{1-\hat{P}}{\hat{P}}. \quad (5)$$

Оценка ВБР на этапе ЛИ. В работе [2] предложен метод оценки НДГ ВБР на этапах ЛИ и эксплуатации с использованием векторов оценок ВБР. НДГ ВБР $\underline{P}_\gamma$ для момента оценки определяется как векторное произведение

$$\underline{P}_\gamma = \underline{P}_\gamma \cdot B, \quad (6)$$

где B — вектор условных вероятностей наступления событий, соответствующих возможным вариантам отказов; $\underline{P}_\gamma$ — вектор НДГ для соответствующих количеств отказов:

$$\underline{P}_\gamma = [\underline{P}_{\gamma 0}, \underline{P}_{\gamma 1}, \dots, \underline{P}_{\gamma n}]; \quad (7)$$

$$B = [B_0, B_1, \dots, B_n]; \quad (8)$$

$\underline{P}_{\gamma i}$ — НДГ при i отказах ($d=i$); B_i — ВБР выборки при i отказах ($d = i$).

Рассмотрим применение метода для двух КА. По формулам (1), (3) и (4) находим точечное значение ВБР на момент окончания ЛИ $\hat{P}_1$ и $\hat{P}_2$. При $n = 1$ и $d = 0$. ВБР за оставшийся САС определяется как

$$\hat{P}_{ост i} = e^{\frac{T_{ост i}}{T_{САС}} \ln \hat{P}_i}, \quad (9)$$

где $T_{САС}$ — длительность САС, $i = 1, 2$.

НДГ $\underline{P}_\gamma^1$ и $\underline{P}_\gamma^2$ для каждого КА оцениваются по формуле (5). Для двух КА возможны случаи: функционируют два изделия ($d = 0$), функционирует одно изделие ($d = 1$), отказали два изделия ($d = 2$). Элементы векторов определяются как

$$B_0 = \hat{P}_{ост 1} \cdot \hat{P}_{ост 2};$$

$$B_1 = \hat{P}_{ост 1} \cdot (1 - \hat{P}_{ост 2}) + (1 - \hat{P}_{ост 1}) \cdot \hat{P}_{ост 2};$$

$$B_2 = (1 - \hat{P}_{ост 1}) \cdot (1 - \hat{P}_{ост 2}); \quad (10)$$

$$\underline{P}_{\gamma 0} = \underline{P}_\gamma^1 \cdot \underline{P}_\gamma^2;$$

$$\underline{P}_{\gamma 1} = \underline{P}_\gamma^1 \cdot (1 - \underline{P}_\gamma^2) + (1 - \underline{P}_\gamma^1) \cdot \underline{P}_\gamma^2;$$

$$\underline{P}_{\gamma 2} = (1 - \underline{P}_\gamma^1) \cdot (1 - \underline{P}_\gamma^2).$$

Формула (7) для двух КА приобретает вид

$$\underline{P}_\gamma = \underline{P}_{\gamma 0} \cdot B_0 + \underline{P}_{\gamma 1} \cdot B_1 + \underline{P}_{\gamma 2} \cdot B_2. \quad (11)$$

Заключение. Использование метода байесовского объединения информации позволяет получить высокие оценки нижних доверительных границ ВБР единичных КА, как на этапе НЭО, так и при цензурированных испытаниях.

Список источников

- [1] Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания. Надежность технических объектов. Москва, Наука, 1989, 322 с.
- [2] Кривопалов Д.М, Давыдов А.Е., Барбул Р.Н. Методика оценки показателей надежности по результатам летных испытаний и эксплуатации. *Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ*, 2023, № 2, с. 7–13.