

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

© О. Г. Байбуз, Ф. А. Приставка, С. В. Земляная

Дніпропетровський державний університет

Наведено порівняльний аналіз показників надійності космічних апаратів, отриманих у результаті реалізації двох обчислювальних схем: процедури імітаційного моделювання та схеми обробки даних про відмови бортових систем під час іспитів прийому-здачі. Порівняння проводиться на основі методу послідовного аналізу.

Одной из трудноразрешимых задач на этапах проектирования, создания и приемо-сдаточных испытаний любой высоконадежной технической системы является определение гарантийного и ресурсного сроков активного функционирования. К подобным техническим системам, наряду с прочими, относят: опытные образцы технических изделий, уникальные технические системы коммерческого назначения, изделия космической техники, космические аппараты. Обоснование прогноза существования подобных систем осложнено, как правило, крайне малыми объемами статистических данных о времени отказов как отдельных комплектующих, так и систем в целом. Обработка данных, полученных при приемо-сдаточных испытаниях, когда отработка режимов функционирования проводится на самой системе в течение длительного периода хранения, требует использования различных способов оценки срока активного существования (САС).

Используемые методики условно разделены на два принципиально разных направления [1]. К первому относят методы, ориентированные на анализ структуры технической системы, особенностей функционирования, заложенных путей восстановления, резервирования. Это так называемая стратегия поиска приемлемого решения задачи нахождения оценки САС с использованием методов имитационного моделирования по логико-вероятностным схемам комплектующих систем и всего КА в целом. Процесс имитационного моделирования осуществляется в два этапа: на первом шаге производится оценка надежности комплектующих систем, по которой на следующем шаге моделируются окончательные оценки показателей надежности КА.

Альтернативное направление состоит в формальном прогнозе времени функционирования КА из

результатов восстановления функции распределения вероятностей по данным отказов. Применявшиеся ранее оценки по среднему в предположении простых распределений (экспоненциальных, смеси экспоненциальных), дают заниженные результаты. Доказано, что подобное восстановление сплайн-распределениями (экспоненциальным, Вейбулла) с двумя узлами склейки позволяет определить как гарантийный, так и ресурсный САС изделия (последнее напрямую связано с физической интерпретацией первого и второго узла сплайн-распределения как характеристик смены режима функционирования системы в целом). Существенным недостатком применения сплайн-распределений является их обоснованность для представительных совокупностей статистических данных. В случае данных об отказах КА зачастую имеют место крайне ограниченные объемы информации. В этой связи для повышения достоверности восстановления сплайн-распределениями в случае ограниченных объемов данных рекомендуется на предварительном этапе искать приближение теоретической функции плотности распределения вероятностей, используя методы приближения по затабулированным значениям, каковыми являются значения частостей гистограммы. Авторами предложен, теоретически исследован и практически апробирован метод проведения подобного анализа по следующей схеме [2]:

- при необходимости проведение «размывания» гистограммы частостей наблюдений отказов (случай крайне ограниченных объемов информации);
- применение уточняющих локальных полиномиальных сплайнов на основе В-сплайнов для нахождения асимптотически точного приближения функции плотности распределения веро-

- ятностей (подобные сплайны представимы в явном виде, что дает возможность предоставления неограниченного массива значений оценки теоретической плотности);
- определение местонахождения узлов склейки для последующего сплайн-восстановления распределений: итерационный метод, основанный на переборе, и асимптотически точный метод (в случае сплайн-экспоненциального распределения);
- сплайн-параметрическое восстановление функции распределения вероятностей.

Применение одного из двух описанных подходов может быть оправдано в каждом конкретном случае. Это зависит от целого ряда факторов. Примером субъективного недостатка применения имитационного моделирования является нецелесообразность предоставления обоснования получения прогноза в материалах, подаваемых на тендер, как содержащих ноу-хау и конфиденциальную информацию о структуре объекта. Объективными факторами влияния на качество применения описанных методик являются: объемы данных наблюдений, информация об отработке комплектующих в ряде других аппаратов, время стендовых приемо-сдаточных испытаний и др. Предпочтение в выборе результатов анализа — отдельная исследовательская задача, требующая применения обоснованных методов и вычислительных схем.

Для определения достоверности оценки параметров предлагается метод последовательного анализа, суть которого в следующем. Пусть по результатам наблюдений случайной величины проведено восстановление распределения. Имеется выборка $t = \{t_i, i = 1, n\}$ из распределения $f(t, \theta)$ и две оценки вектора параметров распределения (вектор θ_1 и θ_2). Гипотезы о параметрах распределений сформулируем следующим образом:

$$H_0: f(t, \theta) = f(t, \theta_1),$$

$$H_1: f(t, \theta) = f(t, \theta_2).$$

В методе последовательной проверки отказываются от постоянного объема выборки и ограничивают его в процессе эксперимента в зависимости от результатов уже выполненных наблюдений. Устанавливается некоторое правило, которым руководствуются при принятии на каждой стадии эксперимента одного из трех решений: принять гипотезу H_0 ; отвергнуть гипотезу H_0 ; продолжить эксперимент и провести дополнительное наблюдение.

Таким образом, проверка проводится последовательно. На основе первого наблюдения (выборка $\{t_1\}$ размера $n = 1$) принимается одно из трех

решений, указанных выше. Если принимается первое или второе решение, то на этом эксперимент заканчивается. Если принимается третье решение, то производится второе наблюдение. На основании выборки $\{t_1, t_2\}$ размера $n = 2$ либо принимается гипотеза H_0 , либо она отвергается, либо считается, что эта выборка недостаточна для принятия окончательного решения. Если принимается третье решение, то производится третье наблюдение и указанная процедура повторяется относительно выборки $\{t_1, t_2, t_3\}$ и т. д. Проверка продолжается до тех пор, пока не будет принято первое или второе решение. Количество n необходимых наблюдений при такой методике проверки является случайной величиной, поскольку зависит от исхода наблюдений.

Очевидно, на каждом m -м этапе m -мерное пространство выборок разбивается не на две, а на три попарно непересекающиеся области: критическую G_1 , допустимую G_0 и промежуточную G_{np} . Если выборочное значение попадает в критическую область G_1 , то гипотеза H_0 отвергается; если — в допустимую область G_0 , то она принимается, и если выборочное значение попадает в промежуточную область G_{np} , то испытания продолжаются.

Число способов разбиения пространства выборок неограничено, поэтому существуют самые разнообразные правила выбора решения, сравнить которые можно с помощью критериев качества. Критерием качества часто выбирают минимальную среднюю стоимость эксперимента. Если считать, что стоимость эксперимента пропорциональна размеру выборки n , то критерием качества последовательного правила выбора решения служит минимум среднего значения размера выборки, необходимый для принятия окончательного решения при условии, что уровень значимости не превышает α , а мощность не меньше $1 - \beta$.

Как показал А. Вальд [3], среди всех правил выбора решений (последовательных и непоследовательных), для которых условные вероятности ошибок не превосходят величин α и β , последовательное правило выбора решения, состоящее в сравнении отношения правдоподобия $L(t_1, \dots, t_n)$ с двумя порогами C_0 и C_1 , приводит к наименьшим значениям $E\{n|H_0\}$ и $E\{n|H_1\}$.

$$C_0 \geq \frac{\beta}{1 - \alpha}, \quad C_1 \leq \frac{1 - \beta}{\alpha}.$$

Для сплайн-экспоненциального распределения с двумя узлами область продолжения испытаний на n -м шаге задается неравенствами [3]:

$$A_n < d_n < R_n,$$

где

$$A_n = \operatorname{sln} \frac{\lambda_1''}{\lambda_1} + (n-s)[(\lambda_1' - \lambda_2')T_1' - (\lambda_1'' - \lambda_2'')T_1''] + \\ + (k-s) \operatorname{ln} \frac{\lambda_2''}{\lambda_2} + \\ + (n-k)[\operatorname{ln} \frac{\lambda_3''}{\lambda_3} - (\lambda_2'' - \lambda_3'')T_2''] + (\lambda_2' - \lambda_3')T_2''] - \\ - \operatorname{ln} \frac{1-\beta}{\alpha},$$

$$R_n = \operatorname{sln} \frac{\lambda_1''}{\lambda_1} + (n-s)[(\lambda_1' - \lambda_2')T_1' - (\lambda_1'' - \lambda_2'')T_1''] + \\ + (k-s) \operatorname{ln} \frac{\lambda_2''}{\lambda_2} + \\ + (n-k)[\operatorname{ln} \frac{\lambda_3''}{\lambda_3} - (\lambda_2'' - \lambda_3'')T_2''] + (\lambda_2' - \lambda_3')T_2''] - \\ - \operatorname{ln} \frac{\beta}{1-\alpha},$$

$$d_n = (\lambda_1'' - \lambda_1') \sum_{i=1}^s t_i + (\lambda_2'' - \lambda_2') \sum_{i=s+1}^k t_i + (\lambda_3'' - \lambda_3') \sum_{i=k+1}^n t_i,$$

s — число, $t_i \leq T_1$, $(k-s)$ — число $T_1 < t_i \leq T_2$; t_i расположены в порядке возрастания.

Если $d_n \leq A_n$, гипотеза H_0 принимается, а если $d_n \geq R_n$ — гипотеза H_0 отвергается.

Исходными данными для принятия решения о показателях надежности КА «Океан-О» на этапах проектирования и экспериментальной отработки являются результаты, полученные при имитационном моделировании функционирования борта КА и его комплектующих систем, а также результаты обработки информации о времени наступления отказов бортовых систем КА. При этом были получены оценки параметров функции распределения времени безотказной работы обеспечивающего комплекса КА, которые имеют следующие значения (в нормированных единицах):

$$\lambda_1'' = 0.1641, \quad \lambda_2'' = 0.2609, \quad \lambda_3'' = 0.3816,$$

$$T_1' = 1.5, \quad T_2' = 4.6.$$

В результате приемо-сдаточных испытаний КА «Океан-О» был обнаружен ряд отказов, связанных как с технологическими дефектами, так и с наработкой комплектующих систем. Для последнего типа отказов был сформирован массив времен их наступления, который имеет следующий вид (в нормированных единицах): $t = \{2.57, 3.463, 6.781\}$.

Для данного массива получены значения параметров сплайн-экспоненциального распределения с двумя узлами следующего вида:

$$\lambda_1' = 0.0523, \quad \lambda_2' = 0.4233, \quad \lambda_3' = 0.7671,$$

$$T_1' = 1.96, \quad T_2' = 6.36.$$

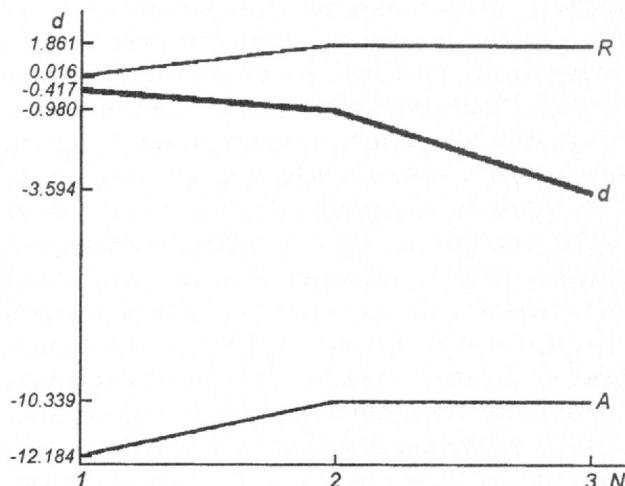
Исходный объем данных довольно мал, в связи с этим для принятия решения о выборе параметров закона распределения необходимо реализовать процесс вычислений пошагово. Решение о приемлемости того или иного метода оценки САС КА принимается на последнем шаге последовательного анализа.

Применим метод последовательного анализа для обработки результатов восстановления сплайн-распределения. Зададимся ошибками первого и второго рода: $\alpha = 0.005$; $\beta = 0.001$. Для указанного вектора значений наблюдений и параметров распределения результаты анализа приведены в таблице и на рисунке.

Из анализа таблицы и графического представления метода последовательного анализа следует, что на каждом шаге значения d принадлежат промежутку $[A, R]$. Это свидетельствует о том, что результаты обработки данных приемо-сдаточных испытаний КА «Океан-О» адекватны результатам имитационного моделирования. Однако наблюдается тенденция к приближению значений d к значе-

Результаты последовательного анализа

Номер шага	A	R	d
1	-12.184	0.016	-0.417
2	-10.339	1.861	-0.980
3	-10.339	1.861	-3.594



Результаты последовательного анализа

ниям A. В связи с этим можно предположить, что при большем объеме данных результаты обработки данных приемо-сдаточных испытаний КА «Океан-О» будут более достоверны, чем результаты имитационного моделирования. Итак, результаты обработки данных приемо-сдаточных испытаний КА «Океан-О» являются уточняющими по отношению к результатам имитационного моделирования. При увеличении объема данных об отказах КА точность восстановления и точность принятия решения методом последовательного анализа будет увеличиваться.

1. Байбуз О. Г., Приставка Ф. А. Методы оценки показателей надежности космического аппарата «Океан-О» // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. — Дніпропетровськ: Навчальна книга, 1998.—Т. 4.—С. 6—13.
2. Вальд А. Последовательный анализ. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960.—328 с.

3. Приставка А. Ф., Измайлова С. В. Моделирование планов испытаний для сплайн-экспоненциального распределения с двумя узлами // Комп'ютерне моделювання: Тез. докл. науч. конф., Дніпродзержинськ, 25—27 червня 1997 р. — Дніпродзержинськ: ДГТУ, 1997.—С. 50.

STRATEGY COMPARISON FOR SPACE VEHICLES' ACTIVE EXISTENCE TERMS ESTIMATION DURING PROTRACTED ACCEPTANCE TESTING

O. G. Baibuz, S. V. Zemlyanaya, F. A. Pristavka

Comparison of reliability indexes estimates of space vehicles by two computational procedures (imitation modeling and data on failures of the on-board systems during tests of manufacturer and consumer) is described. The comparison is based on the sequential analysis method.

УДК 629.76.085.5:629.764

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЕМОЙ НАГРУЗКИ В ОПОРНОМ СЕЧЕНИИ РКН «ЗЕНИТ-3SL»

© О. Э. Арлекинова, А. А. Василенко

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

Викладено методичний підхід до розв'язування задачі надійного запуску ракет-носіїв з плавучої платформи з точки зору навантаження і міцності в рамках проекту «Морський старт». Детально викладено прийняті на основі фізичних міркувань припущення про схему розрахунку. Використана схема розрахунку дозволила досить точно визначити навантаження опорного перерізу ракети-носія, яке є найнебезпечнішим під час стоянки перед стартом.

Проект запуска космического аппарата ракетой космического назначения «Зенит-3SL» со стартовой платформы, расположенной в экваториальной зоне океана, получил название «Морской старт». Внешнее воздействие большой интенсивности, характеризующееся многообразием типов морских волн с переменными во времени амплитудами и периодами колебаний, сложный характер их взаимодействия со стартовой платформой, упругость корпусов стартовой платформы (СП) и ракеты космического назначения (РКН), наличие больших масс жидкости в топливных баках ракеты-носителя и разгонного блока и ряд других факторов чрезвычайно усложняют решение задачи. Для решения указанной задачи были введены некоторые упрощения:

- 1) ввиду различия в массах СП и РКН внешнее воздействие на РКН считается кинематическим;
- 2) стартовая платформа считается абсолютно

твердым телом, положение которого определяется шестью степенями свободы;

3) колебания системы РКН — СП считаются малыми.

Наметившаяся в последнее время тенденция к увеличению интенсивности внешних воздействий за счет увеличения значительной высоты волны и средней скорости ветра делает необходимым учет таких факторов, как упругость элементов конструкции РКН, подвижность компонентов в топливных баках ракеты и др. В этом случае динамическая расчетная схема является системой с бесконечным числом степеней свободы, описываемой дифференциальными уравнениями в частных производных.

Точное решение такой задачи очень сложно, поэтому рассматриваемую систему целесообразно аппроксимировать системой с конечным числом