

---

---

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

---

---

УДК 621.3.019.31

С. В. Покидько, С. Г. Кочура

## КОРРЕКТИРОВКА РЕЗУЛЬТАТОВ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПРИ МАЛЫХ ВЫБОРКАХ

Предложен метод обработки результатов ресурсных испытаний электромеханических устройств при их малых выборках в целях выявления аномальных наблюдений и корректировки данных для повышения точности прогноза ресурса.

*Ключевые слова:* ресурсные испытания, корректировка данных, малая выборка, бутстреп-метод.

Корректировка данных является наиболее трудной проблемой при обработке результатов испытаний. Это обусловлено наличием в наборах данных аномальных величин (выбросов), связанных с ошибками результатов наблюдений или погрешностями их регистрации, сбоями аппаратуры и неоднородностью данных [1]. Поскольку неоднородность данных при испытаниях устройств космических аппаратов (КА) наблюдается нечасто, интерес представляют первые два случая.

С ростом требований к точности оценки технического состояния устройств, связанных с необходимостью увеличения сроков службы КА, методы, основанные на упрощенном прогнозировании нестационарных процессов деградации аппаратуры, становятся неэффективными. Прогнозирование технического состояния устройств по данным ресурсных испытаний на основе традиционных методов без предварительной обработки данных существенно затруднено. Например, при оценке параметров электромеханических устройств и прогнозировании их ресурса по результатам испытаний в условиях мелкосерийного производства необходимо учитывать следующие ограничения:

— малое количество устройств, подвергаемых ресурсным испытаниям (менее десяти образцов);

— незначительные изменения параметров, характеризующих техническое состояние устройств в ходе испытаний;

— дискретность измерений, обусловленная интенсивностью изменений контролируемых параметров, что не позволяет получить достаточное количество значений параметров в течение определенного интервала времени;

— зашумленность результатов испытаний вследствие изменения уровней внешних воздействующих факторов, влияние которых обычно не учитывается, а также возможное наличие выбросов данных (аномальных наблюдений).

В таких условиях прогнозирование ресурса устройств без использования априорной информации о законах распределения параметров и предварительной обработки данных

(в частности, отбраковки аномальных наблюдений) с учетом новых методов — весьма сложная задача.

Для оценки технического состояния электромеханических устройств в целях повышения точности прогноза их ресурса по результатам испытаний разработана помехоустойчивая процедура предварительной обработки данных, позволяющая в большинстве случаев исключать выбросы и осуществлять сглаживание временного ряда. Процедура основана на таких непараметрических методах многомерного статистического анализа данных, как „бутстреп“ и „складной нож“ [2—4], которые инвариантны к закону распределения обрабатываемых данных. Процедура применима в следующих условиях:

- проведение испытаний одновременно для всех образцов;
- моменты измерений равномерно распределены во времени;
- изменение параметра, характеризующее техническое состояние устройства за время, прошедшее между измерениями, много меньше ошибки измерений;
- осуществление измерений после завершения этапа „приработки“ устройств.

Рассмотрим два случая:

1) в некоторый момент времени  $t = t_j$  значения параметров всех испытываемых устройств (будем называть эти данные  $j$ -м временным сечением) определены неверно (вследствие отказа оборудования или наличия устойчивых внешних помех);

2) данные измерений  $j$ -го временного сечения содержат выброс (вследствие ошибки оператора или существенного отклонения одного из воздействующих факторов от его среднего значения).

При определении сечений, содержащих аномальные наблюдения, учитывается, что при отсутствии выбросов среднее значение параметра и его дисперсия с течением времени изменяются незначительно, т.е. распределение параметров, определяющих техническое состояние устройства в смежных временных сечениях, практически одинаково [5]. Такой подход может быть реализован при условии, что выборочные характеристики (статистики) в каждом временном сечении определены корректно. При малом объеме выборки и неизвестном законе распределения вероятностей применение асимптотических формул для расчета выборочных статистик (в предположении, что распределения данных подчиняются нормальному закону) нецелесообразно, так как может привести к значительным ошибкам при прогнозе ресурса вследствие отклонения выборочных оценок от их истинных значений. „Бутстреп“ и „складной нож“ — методы, позволяющие обоснованно перейти к использованию асимптотических соотношений при обработке выборочных данных.

Рассмотрим суть предлагаемого подхода. Пусть в результате ресурсных испытаний ограниченного количества устройств — выборки объемом  $n$  — получены значения выходных параметров  $X_j^i$ ,  $i=\overline{1, n}$ ,  $j=\overline{1, k}$ , где  $k$  — количество временных сечений, используемых для прогноза ресурса. Необходимо получить оценки средних значений  $\bar{X}_j$  в каждом временном сечении, учитывающие отклонение выборочных оценок и дисперсии  $S_j^2$ , а также проверить гипотезу о равенстве средних значений в смежных временных сечениях. Для проверки выводов, основанных на сравнении средних значений, рассчитывается коэффициент корреляции  $\rho_{j,j+1}$  для каждой пары смежных сечений, показывающий меру линейной связи выборочных значений параметров. При отсутствии выбросов коэффициенты  $\rho_{j,j+1}$  для любой пары смежных временных сечений не будут значимо отличаться друг от друга.

Задача статистического оценивания выборочных характеристик в каждом временном сечении, когда случайная выборка  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  объемом  $n$  осуществляется с использованием неизвестного распределения вероятностей  $F$  и необходимо по ее наблюдаемой

реализации  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  оценить выборочное распределение анализируемых статистик  $R(X, F)$  (среднего, дисперсии, коэффициента корреляции), решается бутстреп-методом.

Бутстреп-метод для одновыборочной задачи крайне прост, для ее реализации необходимо [2]:

— осуществить выборочное распределение вероятностей  $\hat{F}$  (непараметрическую оценку наибольшего правдоподобия для  $F$ ), полагая, что в каждой из точек  $x_1, x_2, \dots, x_n$  реализуется равномерное распределение;

— при фиксированном  $\hat{F}$  произвести случайную выборку  $X_i^* = x_i^*$  объемом  $n$ , где  $X^* (X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)$  — бутстреп-выборка;  $x^* (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  — ее реализация;

— аппроксимировать распределение  $R(X, F)$  выборочным бутстреп-распределением  $R^* = R(X^*, \hat{F})$  с помощью случайного механизма для  $\hat{F}$ , значение которого зафиксировано в результате наблюдений.

Повторные реализации  $X^*$  генерируются с помощью случайных выборок объемом  $n$  из распределения  $\hat{F}$  вида  $x^{*1}, x^{*2}, \dots, x^{*N}$ , где  $N$  — количество бутстреп-выборок, а гистограмма  $R(x^{*1}, \hat{F}), R(x^{*2}, \hat{F}), \dots, R(x^{*N}, \hat{F})$  рассматривается как аппроксимация физического распределения  $R$  по повторным выборкам, произведенным методом Монте-Карло. Несложно получить бутстреп-повторения  $R^{*1}, R^{*2}, \dots, R^{*N}$ , модифицировав исходный алгоритм вычисления  $R$ .

Применяя бутстреп-процедуру к выборочным данным каждого  $j$ -го временного сечения, получаем бутстреп-распределения  $\bar{X}_j^N, S_j^{N2}, \rho_{j,j+1}^N$ , по которым вычисляем бутстреп-оценки  $\bar{X}_j^*, S_j^{*2}, \rho_{j,j+1}^*$ , учитывающие отклонения (смещения выборочных оценок).

Используя бутстреп-распределения и бутстреп-оценки и задавая требуемый уровень значимости, определяем пары сечений, в которых средние значения  $\bar{X}_j, \bar{X}_{j+1}$  и дисперсии  $S_j, S_{j+1}$  существенно отличаются. По результатам проверки в простейшем случае исключаются данные сечений, содержащих выбросы.

Более сложной задачей является распознавание неявных выбросов среди результатов измерений в заданный момент времени  $t = t_j$ . Такая задача может быть решена путем комбинированного применения методов „складной нож“ и „бутстреп“.

При использовании метода „складной нож“ из данных измерений  $x_1, x_2, \dots, x_n$  последовательно удаляется каждое  $i$ -е наблюдение и по каждому из  $n$  наборов данных размерностью  $n-1$  рассчитываются оценки дисперсии  $S_i^2$ . Оценка дисперсии, рассчитанная согласно данным, из которых исключен выброс, будет меньше остальных. Применяя бутстреп-процедуру к каждому из  $n$  усеченных наборов данных, получаем для каждого распределения бутстреп-оценку дисперсии. Использование бутстреп-метода в данном случае позволяет не только обеспечить уменьшение отклонения выборочных оценок, но и проверить гипотезу об однородности дисперсий по бутстреп-распределениям, которые можно применять так же, как и реальные распределения [3]. Поскольку для бутстреп-распределений справедливы центральная предельная теорема и закон больших чисел, то справедливы будут и любые асимптотические соотношения, например, для бутстреп-распределений средних, дисперсий и т.д. Применение методов „бутстреп“ и „складной нож“ позволяет уменьшить отклонение выборочных

оценок от значения  $\approx 1/n$  до  $\approx 1/n^2$  [2, 3] и обоснованно перейти к использованию асимптотических выражений для расчета выборочных статистик.

Рассмотрим возможности применения этих методов при обработке результатов ресурсных испытаний электродвигателя вентилятора системы терморегулирования. Техническое состояние устройства определяется, в том числе, параметрами шарикоподшипниковых опор: искажением окружности беговых дорожек, радиальным зазором и различными размерами шариков. Объем выборки  $n = 6$ , дискретность измерений  $\Delta t = 1000$  ч, контролируемый параметр  $a$  — изменение диаметра беговой дорожки внутреннего кольца шарикоподшипника за время между измерениями.

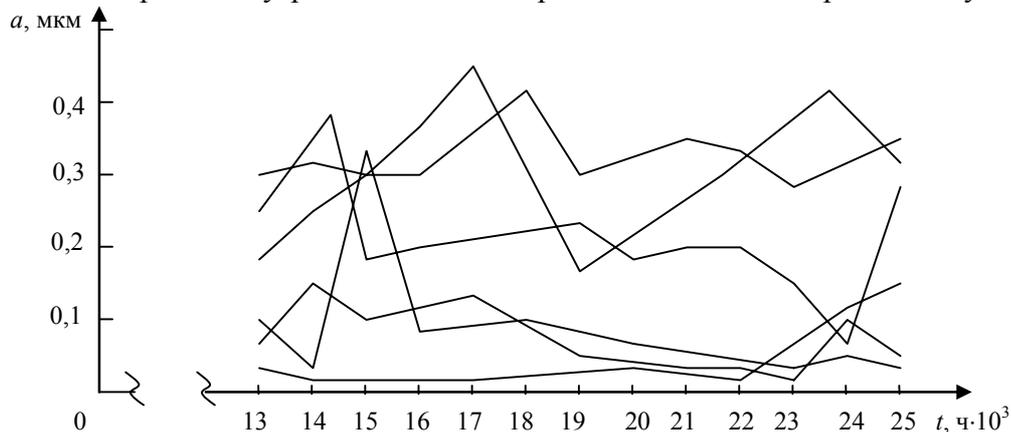


Рис. 1

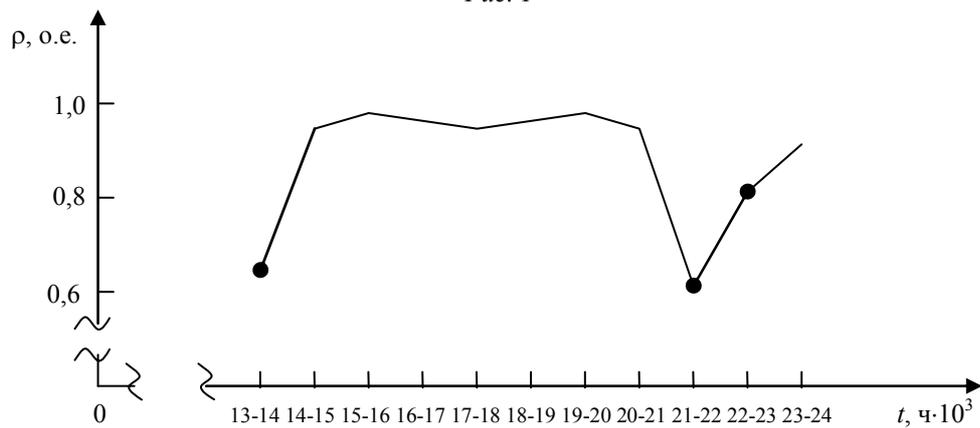


Рис. 2

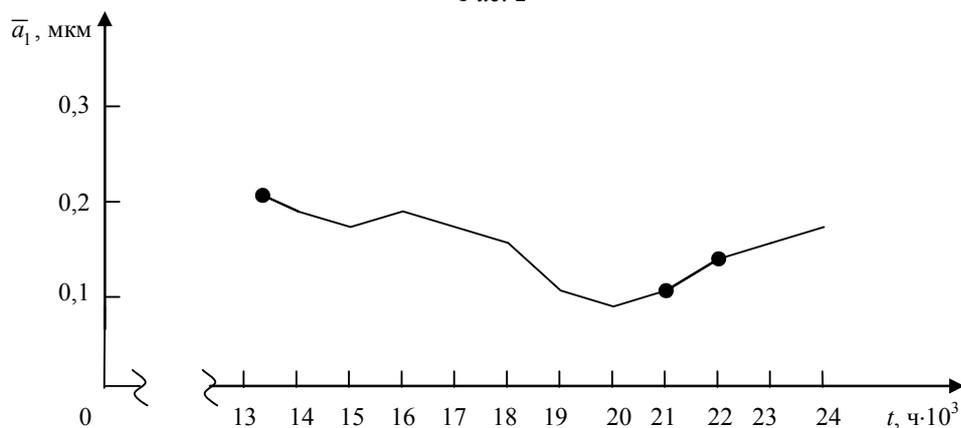


Рис. 3

Результаты испытаний с момента завершения этапа „приработки“ устройств приведены на рис. 1; на рис. 2 — значения коэффициентов парной корреляции данных смежных временных сечений; на рис. 3 — откорректированные с помощью бутстреп-процедуры средние значения параметра  $a$ , точками выделены значения, не корректные согласно данным аномальных наблюдений.

С учетом возможного отклонения оценок из-за малого объема выборки использование в этом случае известных методов не позволяет классифицировать выбросы и строить аппроксимирующую функцию для прогноза ресурса с удовлетворительной точностью.

Сглаживание данных, учитывающее отклонение средних оценок, позволяет увеличить точность прогноза ресурса на 10 %, а удаление сечений, в которых нарушается линейная зависимость результатов испытаний в смежных временных сечениях, обеспечивает увеличение точности прогноза еще на 4 %. Несмотря на отсутствие строгого математического обоснования эта мера может быть принята как дополнительная для сглаживания временного ряда и, в частности, для коротких временных рядов, полученных по результатам испытаний устройств при малой выборке.

Применение предложенного подхода при обработке данных ресурсных испытаний электромеханических устройств КА при малых ( $n < 10$ ) выборках показало повышение точности прогноза ресурса устройств в среднем на 12 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартин Р. Д. Устойчивый авторегрессионный анализ временных рядов // Устойчивые статистические методы оценки данных: Сб. М.: Машиностроение, 1984. С. 121—146.
2. Efron B. Bootstrap methods: another look at the jack-knife // The Annals of Statistics. 1979. Vol. 7, N 1. P. 1—26.
3. Efron B. The Jack-Knife, the Bootstrap and Other Resampling Plans. Philadelphia: PaiSTAM, 1982. 115 p.
4. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа: Сб. статей. М.: Финансы и статистика, 1988. 263 с.
5. Коптев В. М., Покидько С. В., Баянова С. В. Оценка тренда технического состояния электромеханических устройств при ограниченном объеме ресурсных испытаний. М., 1989. Деп. в ЦНТИ „Поиск“, № 035-4408. 7 с.
6. Покидько С. В. Отбраковка аномальных наблюдений при ограниченном объеме ресурсных испытаний // Материалы науч.-техн. конф. „Надежность и эксплуатация технических систем и комплектующих изделий“. Симферополь, 1990. С. 40—43.

#### Сведения об авторах

- Сергей Владимирович Покидько** — канд. техн. наук; Сибирский федеральный университет, Железногорский филиал; E-mail: elin@krasmail.ru
- Сергей Григорьевич Кочура** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; зам. генерального конструктора; E-mail: KOCHURA@iss-reshetnev.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию  
19.11.10 г.