

УДК 691.89

Н.В. Гудков<sup>1</sup>, С.В. Шкробот<sup>2</sup><sup>1</sup> Николаевский специализированный центр боевой подготовки авиационных специалистов Вооруженных Сил Украины, Николаев<sup>2</sup> Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница

## ПРАВИЛО АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОСТАНОВКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Рассматривается правило автоматической остановки моделирования значений контролируемого параметра при прогнозировании технического состояния элементов бортового оборудования авиационной техники при ее эксплуатации по техническому состоянию с контролем параметров. Правило использует двухэтапный подход при планировании эксперимента. На первом этапе используя неравенство Чебышева осуществляется оценка объема выборки при проведении пробного прогона. На втором этапе используется Вальдовский подход к определению минимально необходимого объема моделируемых реализаций.

**Ключевые слова:** прогнозирование технического состояния, моделирование реализаций, объем выборки, планирование эксперимента.

### Введение

**Постановка проблемы.** Важность задач выполняемых бортовым оборудованием (БО) в современной авиационной технике (АТ), часто делает отказ в работе этого оборудования событием чрезвычайным [1], поэтому низкий уровень надежности БО АТ значительно увеличивает затраты на техническую эксплуатацию (ТЭ) АТ в целом [1].

Составной частью процесса ТЭ АТ есть повторяющийся цикл контроля технического состояния (ТС) АТ. Сам цикл контроля состоит из операций измерения, обработки данных, прогнозирования ТС объекта контроля (ОК) в будущем и принятия решения о допуске к дальнейшей эксплуатации [2].

В процессе прогнозирования ТС ОК при ТЭ БО АТ по состоянию с контролем параметров используются методы математического моделирования [1 – 3] при этом существенное влияние на результат прогнозирования оказывает объем набираемой статистики [4].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросу определения минимально необходимого объема выборки в процессе моделирования (планировании машинного эксперимента) посвящено большое количество работ (например [4 – 6]).

Простейшим способом решения проблемы выбора правил автоматической остановки на этапе моделирования является задание требуемого количества реализаций  $N$  (или длины интервала моделирования) [5].

Однако такой детерминированный подход неэффективен, так как в его основе лежат достаточно грубые предположения о виде и параметрах распределения выходных переменных, которые на

этапе тактического планирования являются неизвестными.

Другой способ – задание доверительных интервалов для выходных переменных и остановка моделирования при достижении заданного доверительного интервала, что позволяет теоретически приблизить время моделирования к оптимальному [5].

### Изложение основного материала

Правила автоматической остановки могут быть включены в машинную модель такими способами [4]:

путем двухэтапного проведения прогона, когда сначала делается пробный прогон из  $N^*$  реализаций, позволяющий оценить необходимое количество реализаций  $N$  (причем, если  $N^* \geq N$ , то прогон можно закончить, в противном случае необходимо набрать еще  $N - N^*$  реализаций);

путем использования последовательного анализа для определения минимально необходимого количества реализаций  $N$ , которое рассматривается при этом как случайная величина, зависящая от результатов  $N - 1$  предыдущих реализаций (наблюдений, испытаний) машинного эксперимента.

При определении количества реализаций  $N^*$  при пробном прогоне, потребуем, чтобы выполнялось соотношение:

$$p(\mu - d \leq \bar{x} \leq \mu + d) < \gamma^*, \quad (1)$$

где  $\bar{x}$  – выборочное значение средней;  $\gamma^*$  – вероятность того, что интервал  $\mu \pm d$  содержит  $\bar{x}$  (заданный уровень надежности получаемой оценки вероятности);  $d$  – точность оценки.

Задаваемая надежность  $\gamma^*$  однозначно связана с уровнем значимости  $\alpha^*$  получаемой оценки  $\bar{x}$  формулой  $\gamma^* = 1 - \alpha^*$  [4].

Используем неравенство Чебышева которое справедливо для любых распределений и говорит о том, что при заданном числе  $j$  (не меньшем единицы) и произвольной выборке  $x_1, x_2, \dots, x_{N^*}$  размера,  $N^*$  по меньшей мере,  $1 - 1/j^2$  измерений находятся вблизи среднего значения на расстоянии не более  $j$  среднеквадратических отклонений  $\sigma$  [4]:

$$P\left\{\left|\bar{x} - \mu\right| > j\sigma\right\} \leq \frac{1}{j^2}. \quad (2)$$

Зададим условие, при котором оценка  $\bar{X}$  должна находиться в интервале  $\mu \pm \sigma/s$  ( $s = 2, 4, 6, 8, 10, \dots$ ) с вероятностью  $\gamma^* = 1 - \alpha^*$ , т.е.

$$P\left\{\left|\bar{x} - \mu\right| > \frac{\sigma}{s}\right\} \leq \alpha^*, \quad (3)$$

тогда, используя уравнение (1), получаем:

$$P\left\{\left|\bar{x} - \mu\right| > \frac{\sqrt{N^*}}{s} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N^*}}\right\} \leq \alpha = \frac{m^2}{N^*}, \quad (4)$$

так как  $j = \frac{\sqrt{N^*}}{s}; \frac{1}{j^2} = \frac{s^2}{N^*}$ .

Отсюда находим требуемое количество реализаций при пробном прогоне этапа моделирования:

$$N^* = \frac{s^2}{\alpha^*} = \frac{s^2}{1 - \gamma^*}. \quad (5)$$

Например, при  $s = 4$  и  $\gamma^* = 0,75$  получаем  $N^* = 64$ .

Рассмотрим особенности последовательного планирования машинных экспериментов, построенных на последовательном анализе. В последовательном анализе объем выборки не фиксирован, а после  $i$ -го наблюдения принимается одно из следующих решений: принять данную гипотезу, отвергнуть гипотезу, продолжить испытания, т.е. повторить наблюдения еще раз. Благодаря такому подходу можно существенно уменьшить объем выборки по сравнению со способами остановки, использующими фиксированный объем выборки. Таким образом, последовательное планирование машинного эксперимента позволяет минимизировать объем выборки в эксперименте, необходимой для получения требуемой при исследовании информации. Построив критерий, можно на каждом шаге решать вопрос либо о принятии нулевой гипотезы  $H_0$ , либо о принятии альтернативной гипотезы  $H_1$ , либо о продолжении машинного эксперимента. По-

следовательное планирование машинного эксперимента использует принцип максимального правдоподобия и последовательные проверки статистических гипотез.

Пусть распределение генеральной совокупности характеризуется функцией плотности вероятностей с неизвестным параметром  $Y = f(y, \Theta)$ . Определяются нулевая и альтернативная гипотезы  $H_0 : \Theta = \Theta_0$  и  $H_1 : \Theta = \Theta_1$ . Гипотезы проверяют на основании выборки нарастающего объема. Можно записать: вероятность получения данной выборки  $P_{0m} = f(y_1, \Theta_0) \dots f(y_m, \Theta_0)$  при условии, что верна гипотеза  $H_0$  (правдоподобная выборка); вероятность получения выборки  $P_{1m} = f(y_1, \Theta_1) \dots f(y_m, \Theta_1)$  при условии верности гипотезы  $H_1$ . Процедуру проверки построим на критерии отношении вероятностей  $P_{1m}/P_{0m}$  предложенную А. Вальдом [6]:

$$\frac{\beta}{1 - \alpha} < \frac{P_{1m}}{P_{0m}} < \frac{1 - \beta}{\alpha}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – вероятность ошибки первого рода;  $\beta$  – вероятность ошибки второго рода,  $m = \overline{N^*}, N$ .

На каждом шаге машинного эксперимента определяются  $P_{0m}$  и  $P_{1m}$ , а также проверяется условие:

$$\text{если } \frac{P_{1m}}{P_{0m}} \begin{cases} \leq \frac{1 - \beta}{\alpha}, \text{ принимается гипотеза } H_0; \\ < \frac{\beta}{1 - \alpha}, \text{ моделирование продолжается;} \\ > \frac{1 - \beta}{\alpha}, \text{ моделирование продолжается;} \\ \geq \frac{\beta}{1 - \alpha}, \text{ принимается гипотеза } H_1, \end{cases} \quad (7)$$

При многократном независимом моделировании значений наблюдаемого параметра БО АТ известно, что число успехов  $k$  распределено по биномиальному закону [1] тогда значения вероятностей  $P_{0m}$  и  $P_{1m}$ , можно представить как:

$$P_{0m}(k) = \sum_{i=0}^k C_m^i P_D^i (1 - P_D)^{m-i}, \quad (8)$$

$$P_{1m}(m - k) = \sum_{i=0}^{m-k} C_m^i P_D^i (1 - P_D)^{m-i},$$

где  $P_D$  – допустимая вероятность нахождения контролируемого параметра в зоне допуска,  $m$  – количество машинных экспериментов;  $k$  – количество успехов (нахождение значения контролируемого параметра в зоне допуска);  $m - k$  – количество отказов (количество выходов значения наблюдаемого параметра за границы зоны допуска).

Задавая значения допустимой вероятности нахождения контролируемого параметра в зоне допуска –  $P_d$  и значения вероятностей ошибок первого и второго рода –  $\alpha$  и  $\beta$ , а также используя данные полученные в результате пробного прогона определим значения вероятностей  $P_{0m}$  и  $P_{1m}$ , по формуле (8) для  $m = N^*$  смоделированных реализаций.

Сравнивая отношение,  $P_{1m}/P_{0m}$  и используя правило (7), принимается решение об остановке моделирования в случае, когда неравенство (6) истина, или продолжении моделирования, когда условие не выполняется. В этом случае проводится еще одно моделирование значения контролируемого параметра, и вновь вычисляются значения вероятностей  $P_{0m}$  и  $P_{1m}$  по формулам (8) для  $m = m + 1$  и операции сравнения повторяются.

При практическом использовании правила автоматической остановки моделирования значений контролируемого параметра в процессе прогнозирования ТС БО АТ на первом этапе (этап пробного прогона), как показывают проведенные исследования, значения задаваемой надежности оценки следует  $\gamma^*$  выбирать в диапазоне 0,6-0,8, а значение коэффициента  $s$  2 или 4. При более жестких условиях получаемое количество реализаций  $N^*$  становится невыгодно большим с точки зрения минимизации необходимого объема статистики, например,  $s = 6$  и  $\gamma^* = 0,95$   $N^* = 720$ .

На втором этапе моделирования, значения допустимой вероятности нахождения контролируемого параметра в зоне допуска  $P_d$  и значения вероятностей ошибок первого и второго рода  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются исходя из требований, предъявляемых к прогнозируемой надежности БО АТ.

## Выводы

Предложенное правило автоматической остановки моделирования значений контролируемого параметра позволяет минимизировать объем вычислений при проведении моделирования в процессе прогнозирования технического состояния элементов бортового оборудования авиационной техники при ее эксплуатации по техническому состоянию с контролем параметров.

Алгоритм, реализующий правило имеет достаточно универсальный характер, так как не содержит ограничений на вид и характер процесса эксплуатации.

Правило может использоваться в процессах моделирования значений случайной величины при прогнозировании технического состояния объектов контроля.

## Список литературы

1. Кудрицкий В.Д. Фильтрация, экстраполяция и распознавание случайных функций / В.Д. Кудрицкий. – К.: ФАДА, ЛТД, 2001. – 176 с.
2. Соловьев В.И. Организация эксплуатации авиационной техники / В.И. Соловьев. – К.: НАОУ, 2005. – 222 с.
3. Гудков Н.В. Методика прогнозирования надежности радиоэлектронного оборудования при эксплуатации авиационной техники по состоянию с контролем параметров / Н.В. Гудков // Системы вооружения и военная техника, – 2010. – № 4 (24). – С. 32-35.
4. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 308 с.
5. Советов Б.Я. Моделирование систем : учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 343 с.
6. Вальд А. Последовательный анализ, пер. с англ. / А. Вальд. – М.: Физматгиз, 1960. – 322 с.

Поступила в редколлегию 1.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.И. Сидоренко, Институт радиопизики и электроники НАН Украины, Харьков.

### ПРАВИЛО АВТОМАТИЧНОЇ ЗУПИНКИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРА, ЯКИЙ КОНТРОЛЮЄТЬСЯ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ Авіаційної ТЕХНІКИ

М.В. Гудков, С.В. Шкробот

*Розглядається правило автоматичної зупинки моделювання значень параметра який контролюється при прогнозуванні технічного стану бортового обладнання авіаційної техніки при її експлуатації за технічним станом з контролем параметрів. Правило використовує двох етапний підхід при плануванні експерименту. На першому етапі використовується нерівність Чебишева здійснюється оцінка об'єму вибірки при проведенні пробного прогону. На другому етапі використовується Вальдовський підхід до визначення мінімально необхідного об'єму реалізацій що моделюються.*

**Ключеві слова:** прогнозування технічного стану, моделювання реалізацій, об'єм вибірки, планування експерименту.

### RULE OF AUTOMATIC STOP OF DESIGN OF VALUES OF THE CONTROLLED PARAMETER AT PROGNOSTICATION OF THE TECHNICAL STATE OF SIDE EQUIPMENT OF AEROTECHNICS

M.V. Gudkov, S.V. Shkrobot

*The rule of automatic stop of design of values of the controlled parameter is examined at prognostication of the technical state of elements of side equipment of aerotechnics during its exploitation on the technical state with control of parameters. A rule is utilized by a twostage approach at planning of experiment. On the first stage utilizing inequality of Chebyshev the estimation of sample size is carried out during the leadthrough of the trial driving away. On the second stage Val'dovskiy is utilized going near determination minimum of necessary volume of the designed realization.*

**Keywords:** prognostication of the technical state, design of realization, sample size, planning of experiment.