

УДК 621.01:629.7.01

А.В. ТОМАШЕВСКИЙ, А.А. ТЕВС

*Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина*

## АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Рассмотрены статистические методы, используемые для обеспечения надежности сложных технических систем (СТС) на всех этапах жизненного цикла – при проектировании, производстве и эксплуатации. Определена общая схема расчета надежности системы по результатам испытаний. Обращено внимание, что такие СТС, как летательные аппараты, авиадвигатели, относятся к классу стохастических динамических систем, и при их эксплуатации в любой момент времени возможно возникновение отказа. Предложено, для обеспечения надежности функционирования СТС на этапе эксплуатации, осуществлять мониторинг значений параметров состояния элементов системы и строить по получаемым данным контрольные карты с помощью программного пакета STATISTICA. Как пример мониторинга надежности построены контрольные карты для параметра «Вибрация левого двигателя», на основе информации с бортового устройства регистрации полётных данных.*

**Ключевые слова:** сложная техническая система, летательные аппараты, авиадвигатель, стохастические динамические системы, мониторинг, контрольные карты.

### Введение

Надежность – одно из важнейших свойств, характеризующих сложную техническую систему (СТС).

Согласно [1], понятие надежности определяется как «збірний термін, який вживають для описування характеристики готовності та чинників, що її зумовлюють. характеристик безвідмовності, ремонтпридатності і забезпеченості технічного обслуговування». Данное определение соответствует международным стандартам и несколько отличается от определения надежности, сделанного в более ранних нормативных документах [2], где понятие надежности определяется как «свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования». По данному определению надежность характеризует изделие (объект) так же, как и другие конструктивно-технологические параметры, такие как габариты, вес и т.п. В определенной степени это справедливо, однако большинство СТС, в частности, такие, как летательные аппараты, авиадвигатели относятся к классу стохастических динамических систем. При эксплуатации такого класса СТС в любой момент времени возможно возникновение непредвиденных внешних или внутренних воздействий, что может привести к мгновенному отказу.

Обеспечение эксплуатационной надежности (надежности функционирования) особо актуально для летательных аппаратов, авиадвигателей, где отказ системы в целом или её отдельных элементов может привести к катастрофическим последствиям. Для обеспечения надежности функционирования необходимо непрерывно осуществлять мониторинг значений параметров состояния элементов СТС и анализировать получаемые данные с помощью статистических методов.

В данной работе ставится задача – сделать анализ статистических методов, используемых при оценке надежности СТС, как готового изделия, и при обеспечении надежности функционирования СТС по результатам мониторинга.

### 1. Материалы исследования и анализ полученных результатов

Проблема обеспечения надежности СТС решается на всех этапах жизненного цикла системы – при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Соответственно этапу жизненного цикла отказы классифицируются по видам как: конструкционные отказы, к которым относят отказы, обусловленные ошибками в проектировании, в определении условий эксплуатации; производственные отказы – отказы, связанные с несовершенством или нарушениями технологического процесса; эксплуатационные отказы – отказы, возникающие при эксплуатации.

Каждый из видов отказов имеет свои особенности, что и определяет используемые методы оценки надежности.

На этапе проектирования осуществляется проектная оценка надежности, для чего используются методы прогнозирования. После изготовления СТС производятся разнообразные испытания для проверки соответствия объекта заданным требованиям к надежности. При этом проверяются результаты прогнозирования, и оценивается технология изготовления СТС. Для расчетов надежности СТС удобно использовать структурно-логические схемы надежности, которые отображают взаимосвязь элементов СТС и их влияние на надежность системы в целом. Структурно-логическая схема представляет собой совокупность выделенных элементов, соединенных последовательно или параллельно. Критерием для определения вида соединения элементов является влияние их отказа на надежность.

Оценка надежности элементов СТС основана на статистической обработке данных, получаемых при испытаниях или эксплуатации объекта. Получаемые при этом показатели надежности (безотказность, срок службы, технический ресурс и др.) используются при расчете надежности СТС. Результаты расчетов отражаются в нормативно-технической документации и характеризуют, в общем, надежность СТС.

Определение показателей надежности элемента СТС основано на статистической обработке результатов испытаний.

Наиболее важная составляющая надежности – это безотказность. Количественно безотказность можно оценить такими показателями, как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа, гамма-процентная наработка до отказа. Оцениваются эти показатели для элемента определенного вида на основании испытаний  $n$  элементов как статистические характеристики двух случайных величин - наработка до отказа  $t$  и количества элементов, которые отказали на протяжении времени испытаний. Возникновение отказа является случайным событием, поэтому время появления отказа (наработка до отказа  $t$ ) и количество отказавших элементов – также случайные величины.

Вероятность безотказной работы изделия  $P(t)$  – это вероятность того, что при заданных режимах и условиях работы в заданном интервале времени отказ не возникает.

Средняя интенсивность отказов  $\lambda(t, \Delta t)$  – это количество элементов, которые отказали, отнесенное к количеству элементов, которые непрерывно работали к началу испытаний, и к времени, на протяжении которого происходило испытание:

$$\bar{\lambda}(t, \Delta t) = \frac{\Delta n}{(N - n)\Delta t}, \quad (1)$$

где  $\Delta n$  – количество элементов, которые отказали на протяжении времени испытаний  $\Delta t$ ;  $n$  – количество элементов, которые отказали к началу испытаний;  $N$  – это количество элементов на начало испытаний, на время  $t = 0$ .

Введем понятие мгновенной интенсивности отказов  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\lambda}(t, \Delta t) = -\frac{P'(t)}{P(t)}. \quad (2)$$

Из (2) после преобразований получим:

$$P(t) = \exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (3)$$

Если  $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$ , то  $P(t) = \exp(-\lambda t)$ .

Средняя наработка до отказа  $\bar{T}$  – это оценка математического ожидания наработки до отказа:

$$M(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = -\int_0^{\infty} t \frac{dP(t)}{dt} dt = -\int_0^{\infty} t dP(t). \quad (4)$$

Оценивается величина  $\bar{T}$  средним арифметическим выборочных значений  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ , где  $t_i$  – наработка до отказа  $i$ -го элемента системы,  $n$  – число испытываемых элементов.

Аналогично средней наработки до отказа, определяется срок службы, технический ресурс.

Используемые статистические методы для оценки основных показателей надежности относятся к методам описательной статистики. Получаемые показатели надежности позволяют оценивать надежность непосредственно на момент испытаний и используются для характеристики надежности СТС как свойства готового изделия.

При эксплуатации СТС надежность каждого конкретного изделия, как способность выполнять свои функции в соответствии с назначением, будет изменяться со временем, так как каждое изделие имеет только ему присущие особенности, и в любой момент времени возможно возникновение непредвиденных воздействий, которые могут привести к отказу. Для летательных аппаратов отказ может привести к катастрофическим последствиям. Для уменьшения вероятности отказа необходимо непрерывно осуществлять наблюдения за параметрами СТС, определяющими её надежность, т.е. необходим мониторинг надежности функционирования СТС. Суть мониторинга заключается в систематических измерениях параметров состояния СТС, определяющих надежность функционирования. Так как параметры состояния стохастической системы являются случайными величинами, то для оценки на-

дежности функционирования требуется использование статистических методов. Отказ СТС наступает, когда значения какого-либо параметра состояния системы превысят критическое значение.

Предположим, что некоторый показатель состояния  $x$  подчиняется нормальному закону распределения  $N(x, \mu, \sigma)$ , где  $\mu$  - математическое ожидание,  $\sigma^2$  - дисперсия. Зададимся значениями  $\mu = \mu_0$  и  $\sigma = \sigma_0$  для характеристики нормального функционирования СТС (система в работоспособном состоянии). Если значения  $\mu$  и/или  $\sigma$  изменятся до значений  $\mu_1$ ,  $\sigma_1$  одновременно или изменится хотя бы один из параметров при неизменности другого, то будем считать, что произошло существенное изменение надежности функционирования СТС.

Для обнаружения существенных изменений со временем показателя состояния  $x$  нашли применение контрольные карты Шухарта и кумулятивных сумм (ку-сумм) [3,4]. На контрольных картах Шухарта отображается изменение значений  $x$  со временем, они более наглядны. Контрольные карты кумулятивных сумм более чувствительны к малым сдвигам  $\delta = \mu_1 - \mu_0$ . Особенности мониторинга надежности функционирования СТС с использованием контрольных карт ку-сумм детально рассмотрены в [5].

В качестве исходных данных для статистического исследования выбран параметр «Вибрация левого двигателя», регистрируемый бортовым устройством регистрации полётных данных. Значения параметра взяты с 18-ой по 46-ую минуты полёта, это такой промежуток времени, когда самолёт находился на наибольшей высоте над уровнем моря.

С помощью модуля Quality Control Charts программного пакета Statistica [6] для параметра «Вибрация левого двигателя» реактивного самолета построены контрольные карты - Шухарта (X-карта) и ку-сумм (рис. 1, 2). Время снятия информации пронумеровано от 1 до 37. Границы на обеих картах определены соответственно доверительной вероятности 99% для получения сигнала о существенном сдвиге  $\mu$  при  $\mu_0 = 13$  мм/с и  $\sigma_0 = 5$ .

Из представленных результатов наглядно видно, что если по X-карте сдвиг уровня контролируемого параметра не наблюдается, то при использовании карты ку-сумм явно наблюдается существенные изменения  $\mu$  во время полета.

### Заключение

Рассмотрены статистические методы, используемые для обеспечения надежности сложных технических систем (СТС) на всех этапах жизненного цикла – при проектировании, производстве и экс-

плуатации. Показаны особенности статистической оценки вероятности безотказной работы, интенсивности отказов, наработок до отказа, для элементов СТС.



Рис. 1. Контрольная карта Шухарта для параметра «Вибрация левого двигателя»

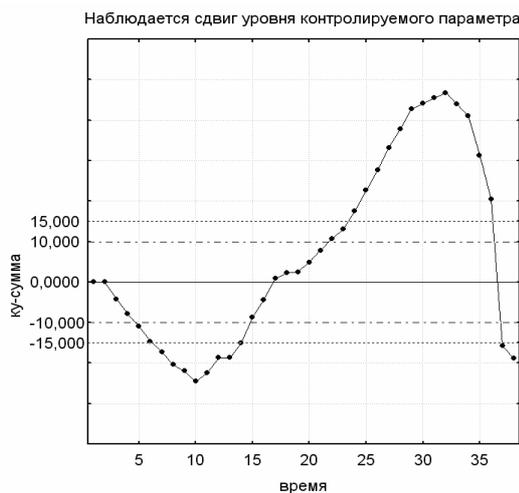


Рис. 2. Контрольная карта ку-сумм для параметра «Вибрация левого двигателя»

На этапе эксплуатации СТС, как стохастической динамической системы, в любой момент времени возможно возникновение непредвиденных воздействий, которые могут привести к мгновенному отказу. Для обеспечения надежности функционирования СТС на этапе эксплуатации предложено осуществлять мониторинг значений параметров состояния элементов СТС и строить по получаемым данным контрольные кумулятивных сумм как более чувствительные к изменению контролируемых параметров. Как пример, мониторинга надежности функционирования самолета построены контрольные карты для параметра «Вибрация левого двигателя».

## Литература

1. ДСТУ ISO 9000-2001 (ISO 9000:2000, IDT). Системи управління якістю. Основні положення та словник. – Чинний від 27.06.2001. – К.: Держстандарт України, 2001. – 32 с.
2. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.dnaop.com/html/2273.html>. – 10.05.2011.
3. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017-2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001. – Введен впервые. –

М.: Изд-во стандартов, 2005. – 26 с.

4. ГОСТ Р 50779.45-2002. Статистические методы. Контрольные карты кумулятивных сумм. Основные положения. – Введен впервые – М.: Госстандарт России, 2002. – 14 с.

5. Томашевский А.В. Мониторинг надежности функционирования технических систем / А.В. Томашевский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 7 (74). – С.150-154.

6. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. Боровиков. – СПб: Питер, 2001. – 656 с.

Поступила в редакцию 26.05.2011

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой В.В. Погосов, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

## АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

*О.В. Томашевський, А.О. Тевс*

Розглянуто статистичні методи, використовувані для забезпечення надійності складних технічних систем (СТС) на всіх етапах життєвого циклу – при проектуванні, виробництві й експлуатації. Визначено загальну схему розрахунку надійності СТС на основі статистичної оцінки показників надійності елементів системи за результатами випробувань. Звернено увагу, що такі СТС, як літальні апарати, авіадвигуни належать до класу стохастичних динамічних систем і при їхній експлуатації в будь-який момент часу можливе виникнення відмови. Запропоновано, для забезпечення надійності функціонування СТС на етапі експлуатації, здійснювати моніторинг параметрів стану елементів системи й будувати за одержуваним даними контрольні карти за допомогою програмного пакета STATISTICA. Як приклад моніторингу надійності побудовані контрольні карти для параметра «Вібрація лівого двигуна» на підставі інформації з бортового пристрою реєстрації польотних даних.

**Ключові слова:** складна технічна система, літальні апарати, авіадвигун, стохастичні динамічні системи, моніторинг, контрольні карти.

## ANALYSIS OF STATISTICAL METHODS OF ENSURING COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS RELIABILITY

*A.V. Tomashevskiy, A.A. Tevs*

The statistical methods used for ensuring the reliability of complex technical systems (CTS) at all stages of life cycle such as designing, manufacture and operation are considered. The general scheme of CTS reliability calculation based on a statistical estimation of indicators of reliability of elements of system by results of tests is defined. The attention is paid that such CTS as aircrafts, aircraft engines belong to the class of stochastic dynamic systems and while their operation the occurrence of failure is possible at any moment. For maintenance the CTS functioning reliability at the operation phase it is offered to carry out monitoring of values of parameters of the system elements condition and to build control charts by means of software package STATISTICA based on the received data. As an example of reliability monitoring control cards for parameter «Vibration of the left engine» were built on the basis of the information from the flight recorder.

**Keywords:** complex technical system, aircrafts, aircraft engine, stochastic dynamic systems, monitoring, control charts.

**Томашевський Александр Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри мікро- і наелектроніки Запорожського національного технічного університету, Запорожье, Україна, e-mail: [tmsh@mail.ru](mailto:tmsh@mail.ru)

**Тевс Анастасія Александровна** – студентка 5 курсу радіоприборостроїтельного факультета Запорожського національного технічного університету, Запорожье, Україна.