

УДК 621.01:629.7.01

А.В. ТОМАШЕВСКИЙ

Запорожский национальный технический университет, Украина

МОНИТОРИНГ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для обеспечения эксплуатационной надежности технических системы, таких как летательные аппараты, авиадвигатели предложено использовать метод кумулятивных сумм, что позволяет повысить информативность результатов мониторинга состояния системы. Технические системы рассмотрены как стохастические динамические системы, в которых для мониторинга выделяются элементы более низкого иерархического уровня, существенно влияющие на надежность и с исчерпанными возможностями резервирования (восстановления) или невозможности восстановления. Предложена процедура образования кумулятивных сумм при предположении нормального закона распределения контролируемого параметра состояния технической системы. Использование метода кумулятивных сумм позволит в более короткое время, по сравнению с обычной схемой наблюдения за состоянием технической системы, получить предупредительный сигнал об ухудшении надежности.

Ключевые слова: технические системы, летательные аппараты, авиадвигатель, стохастические динамические системы, мониторинг, метод кумулятивных сумм.

Введение

Повышения надежности функционирования технических систем (ТС) является сложной многоплановой задачей, которая решается на всех этапах жизненного цикла ТС. Особое значение имеет обеспечение эксплуатационной надежности таких ТС, как летательные аппараты, авиадвигатели, где отказ системы в целом или её отдельных элементов может привести к катастрофическим последствиям. Для решения задачи диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей при эксплуатации нашли использование статистические методы, нейронная информатика, теория распознавания образов. В фундаментальной монографии [1] показано использование различных подходов, в т.ч. и интеллектуальных информационных технологий, для обеспечения надежности авиадвигателей. Экспериментально-статистические и нейросетевые методы изложены в [2].

Общей чертой всех используемых на настоящее время методов обеспечения эксплуатационной надежности является то, что они позволяют оценивать надежность непосредственно на момент испытаний и/или осуществлять прогнозирование по полученным при испытаниях результатам.

Однако при эксплуатации ТС в любой момент времени возможно возникновение непредвиденных воздействий, которые могут привести к снижению эксплуатационной надежности. Необходимо непрерывно осуществлять наблюдения за параметрами

ТС, определяющими её надежность, т.е. необходим мониторинг надежности функционирования технических систем.

Важнейшей задачей при мониторинге надежности представляется своевременное обнаружения ухудшения надежности системы. Такие ТС, как летательные аппараты, авиадвигатели относятся к классу стохастических динамических систем, мониторинг надежности которых целесообразно проводить с использованием модели «черного ящика». Выходные переменные «черного ящика» - это непрерывно измеряемые параметры состояния ТС, на которые оказывают влияние внутренние и внешние факторы различной природы. Отказ ТС наступает, когда значения какого-либо параметра состояния системы превысит критическое значение.

Ставится задача – на основе непрерывного мониторинга значений параметров состояния ТС в кратчайшее время получить сигнал об ухудшении надежности ТС. Для решения поставленной задачи предлагается использование метода кумулятивных сумм (ку-сумм).

1. Материалы исследования и анализ полученных результатов

Объектом исследования являются ТС, рассматриваемые как стохастические динамические системы, состояние которых контролируется векторным параметром состояния y с функцией распределения, $F(\vec{y}, \vec{\theta})$ где $\vec{\theta}$ – параметры распре-

ления. Компоненты вектора \vec{y} – непрерывно измеряемые параметры состояния ТС. Для таких ТС, как летательные аппараты, авиадвигатели при мониторинге надежности целесообразно выделить элементы системы, оказывающие существенное влияние на надежность.

В дальнейшем, под ТС будем понимать элемент системы более низкого иерархического уровня, который существенно влияет на надежность и с исчерпанными возможностями резервирования (восстановления) или невосстанавливаемый.

Отказ возникает при попадании значений параметра состояния \vec{y} в некоторую критическую область $Y_{кр}$. Мониторинг надежности эффективен только для отказов, которые возникают при постепенном изменении параметра состояния, что обычно связано с развитием деградационных процессов. Критическую область $Y_{кр}$ целесообразно разбить на две области – предупредительную и возникновения отказа. Попадание значений параметра в предупредительную область указывает на высокую вероятность тренда математического ожидания контролируемого параметра в область возникновения отказа.

Рассмотрим один произвольно выбранный выходной показатель состояния y , подчиняющийся функцией распределения, $F(y, \vec{\theta})$. Для измеряемых показателей состояния ТС можно предположить нормальный закон распределения, параметры которого: $\theta_1 = \mu$ – математическое ожидание, определяющие центр группирования (уровень контролируемого параметра) и $\theta_2 = \sigma^2$ – дисперсия, характеризующая рассеивание параметра. Проведенные исследования закона распределения таких параметров авиадвигателя как тяга двигателя, давление в камере сгорания, частоты вращения вентилятора, ротора высокого и среднего давления и др. подтверждают сделанное предположение. Определить предупредительную область возникновения отказа можно, задавшись значением сдвига $\delta = \mu_1 - \mu_0$, где μ_0 – уровень контролируемого параметра при нормальной работе, μ_1 – уровень, соответствующий попаданию в предупредительную область.

Для определения потенциальной возможности возникновения отказа (мониторинга надежности) необходимо с периодичностью соответствующей получению результатов измерения параметра состояния осуществлять проверку статистических гипотез относительно уровня контролируемого параметра μ :

$$\begin{aligned} H_0: \mu &= \mu_0, \\ H_1: \mu &= \mu_1, \end{aligned} \quad (1)$$

Данная задача аналогична задаче обнаружения «разладки» технологического процесса [3]. Исходя из предположения о постепенном изменении контролируемого параметра, для её решения целесообразно применение метода ку-сумм.

Сущность метода ку-сумм заключается в следующем. Необходимо, исходя из результатов измерений значений контролируемого параметра $Y_1, Y_2, \dots, Y_n, Y_{n+1}, Y_{n+2}, \dots, Y_m$, проверить нулевую гипотезу H_0 о том, что Y_1, Y_2, \dots, Y_m взяты из совокупности с функцией распределения $F(y, \mu_0, \sigma^2)$, против альтернативной H_1 , заключающейся в том, что наблюдения y_1, y_2, \dots, y_n принадлежат совокупности с $F(y, \mu_0, \sigma^2)$, а наблюдения $y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_m$ – совокупности с $F(y, \mu_1, \sigma^2)$. Для проверки гипотез H_0, H_1 с появлением каждого нового измерения параметра состояния определяем последовательный критерий Вальда [4], который и является теоретической основой метода ку-сумм.

Выражение для образования ку-суммы Z_n можно получить из отношения функций правдоподобия [4]:

$$Z_n = \ln(P_{ln} / P_{0n}), \quad (2)$$

где $P_{ln} = f(y_1, \mu_1)f(y_2, \mu_1), \dots, f(y_n, \mu_1)$;
 $P_{0n} = f(y_1, \mu_0)f(y_2, \mu_0), \dots, f(y_n, \mu_0)$;
 $f(y, \mu)$ – плотность вероятности функции распределения $F(y, \mu, \sigma^2)$.

Значения кумулятивной суммы Z_n накапливаются последовательно с каждым новым результатом измерения контролируемого параметра состояния.

При нормальном законе распределения выражение (2) преобразуется к виду:

$$Z_m = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{i=1}^m (x_i - \mu_0 + \frac{(\mu_1 - \mu_0)\sigma}{2}), \quad (3)$$

При проведении мониторинга нулевая гипотеза H_0 принимается, если $Z_n \leq \ln((1 - \beta) / \alpha)$, альтернативная H_1 , - если $Z_n \geq \ln((1 - \beta) / \alpha)$, где α и β – ошибки первого и второго рода, соответственно. Принятие гипотезы H_1 указывает на достижение предупредительной критической области.

Одной из составляющих эффективности мониторинга надежности является обнаружение ухудшения надежности в кратчайшее время. На ухудшение надежности указывает сдвиг уровня контролируемого параметра в нежелательном направлении.

Хорошо известно (см., например, [5]), что ку-суммы указывают на сдвиг уровня контролируемого параметра гораздо быстрее по сравнению с обычной

схемой наблюдений. Для наглядного представления преимуществ использования ку-сумм при мониторинге надежности приведем результаты наблюдений за состоянием ТС по обычной схеме (рис. 1) и с использованием ку-сумм (рис. 2).

Для исследования различных схем мониторинга используем имитационное моделирование значений параметров состояния ТС, причем в некоторый момент времени имитируется сдвиг уровня контролируемого параметра состояния. Полученная при этом последовательность значений параметров состояния ТС анализируется с помощью различных схем мониторинга.



Рис. 1. Результаты мониторинга надежности ТС по обычной схеме

При проведении мониторинга целесообразно использовать нормированные значения контролируемого i -го параметра состояния:

$$x_i = (y_i - \mu_i) / \sigma_i, \quad (4)$$

где x_i - нормированное значение параметра;

y_i - реальное значение параметра;

μ_i - математическое ожидание параметра;

σ_i - среднеквадратичное отклонение параметра.

Последовательность нормированных значений определенного параметра состояния моделировалась с помощью программного датчика псевдослучайных нормально-распределенных чисел:

$$x = \mu + \sigma \cos(2\pi\varepsilon_1)(-2 \ln \varepsilon_2)^{1/2}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - равномерно-распределённые в интервале $[0,1]$ псевдослучайные числа.

Порядковый номер значения x в моделируемой последовательности имитирует время проведения измерения контролируемого параметра состояния.

В обычной схеме мониторинга надежности ТС наблюдаются и анализируются независимо полученные в определенные моменты времени значения контролируемого параметра. Для имитации обычной схемы мониторинга моделировались псевдослу-

чайные нормально-распределенные числа с $\mu = 1, \sigma = 1$, но, начиная с 20-го наблюдения, величина μ для моделируемых значений сдвигается до $\mu = 1$. Такой сдвиг уровня контролируемого параметра имитирует значительное ухудшение надежности.

Результаты моделирования показаны на рис. 1.

В схеме мониторинга надежности ТС с использованием ку-сумм последовательно с каждым новым измерением накапливается ку-сумм, что позволяет учитываться предыдущее состояние системы. Последовательность псевдослучайных чисел при имитации схемы мониторинга надежности с использованием ку-сумм взята аналогично обычной схеме, т.е. с имитацией сдвига, начиная 20-го наблюдения. Результаты моделирования показаны на рис. 2.



Рис. 2. Мониторинг надежности с использованием ку-сумм

Из представленных результатов моделирования обычной схемой (рис. 1) и с использованием ку-сумм (рис. 2) наглядно видно, что если по обычной схеме трудно определить сдвиг уровня контролируемого параметра, то такой сдвиг явно наблюдается при использовании метода ку-сумм.

Заключение

Технические системы рассмотрены как стохастические динамические системы. Выделены элементы системы более низкого иерархического уровня, существенно влияющие на надежность, для которых предложена схема мониторинга параметров состояния с использованием метода кумулятивных сумм.

Предложена схема мониторинга надежности технических систем с использованием метода кумулятивных сумм. Показано, что использование метода кумулятивных сумм позволяет обнаружить постепенные отказы в более короткое время, по сравнению с обычной схемой мониторинга надежности.

Сокращение времени обнаружения отказа имеет особо важное значение для обеспечения эксплуатационной надежности элементов таких технических систем, как летательные аппараты и авиадвигатели.

Литература

1. *Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: монография / В.А. Богуслаев и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2009. – 468 с.*

2. *Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей: моно-*

графия / В.И. Дубровин и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 279 с.

3. *Томашевский А.В. Использование последовательного критерия Вальда для обнаружения «разладок» технологических операций / А.В. Томашевский., Г.В. Снежной // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 10 (57). – С. 222-226.*

4. *Вальд А. Последовательный анализ: монография / А. Вальд. – М.: Наука, 1980. – 326 с.*

5. *Бендерский А.М. Оценка эффективности последовательных процедур обнаружения разладки методом имитационного моделирования / А.М. Бендерский, А.В.Томашевский // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1988. – № 1. – С. 193-194.*

Поступила в редакцию 31.05.2010

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

МОНІТОРИНГ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

О.В. Томашевський

Для забезпечення експлуатаційної надійності технічні системи, таких як літальні апарати, авіадвигуни запропоновано використовувати метод кумулятивних сум, що дозволяє підвищити інформативність результатів моніторингу стану системи. Технічні системи розглянуті як стохастичні динамічні системи, у яких для моніторингу виділяються елементи більш низького ієрархічного рівня, що істотно впливають на надійність і з вичерпаними можливостями резервування (відновлення) або не відновлювані. Запропоновано процедуру утворення кумулятивних сум при припущенні нормального закону розподілу контрольованого параметра стану технічної системи. Використання методу кумулятивних сум дозволить у більше короткий час, у порівнянні зі звичайною схемою спостереження за станом технічної системи, отримати попереджувальний сигнал про погіршення надійності.

Ключові слова: технічні системи, літальні апарати, авіадвигун, стохастичні динамічні системи, моніторинг, метод кумулятивних сум.

MONITORING OF RELIABILITY OF FUNCTIONING TECHNICAL SYSTEMS

A.B. Tomashivskiy

In order to maintain operational reliability of technical systems, such as flying devices, aircraft engines it is offered to use a method of the cumulative sums that allows to raise self-descriptiveness results of system condition monitoring. Technical systems are considered as stochastic dynamic systems, where the elements of lower hierarchical level essentially influencing reliability and possessing settled possibilities of reservation (restorable) or no restorable are allocated for monitoring. Procedure cumulative sums formation is offered at the assumption of the normal law of distribution of controllable parameter of technical system condition. Usage of the cumulative sums method will allow to receive a warning signal about reliability deterioration in a shorter time, in comparison with the usual scheme of supervision over a condition of technical system.

Key words: technical systems, flying devices, an aircraft engine, stochastic dynamic systems, monitoring, a cumulative sums method.

Томашевский Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры микро и нано-электроники Запорожского Национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: tmsh@mail.ru.