УДК 621.002:681.324

В.В.Голикова, Е.Л. Первухина

СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Завершающим этапом производства машиностроительных изделий являются испытания, в ходе которых оценивают качество и проверяют соответствие параметров изделий техническим условиям. Поскольку основная измерительная информация в ходе испытаний формируется по результатам последовательных измерений диагностических параметров и имеет вид случайных процессов, одним из наиболее распространенных методов оценки состояния готовых к эксплуатации изделий является статистический контроль. Известны многие методы статистического контроля [1]. Однако применение большинства из них ограничено стационарными процессами, тогда как для целей диагностики наиболее информативными являются нестационарные случайные процессы, отражающие, в том числе, изменение режимов испытуемых изделий.

В настоящее время появились новые методы анализа многомерных нестационарных процессов. Преимущество их использования для обработки измерительной информации в ходе испытаний заключается в возможности определения причинно-следственных зависимостей между параметрами изделий, что позволяет не только оценивать значения отдельных параметров, но и прогнозировать техническое состояние изделий в целом [2]. К сожалению, возможности анализа ограничивает предположение о медленном изменении характеристик процессов в интервале наблюдения.

Предлагается метод оценки технического состояния машиностроительных изделий на стадии производственных испытаний, допускающий изменение свойств (разладку) процессов в режиме реального времени.

Исследуемые случайные процессы отражают экспериментальную (измерительную) информацию о последовательных значениях диагностических параметров испытуемых изделий, регистрируемых контрольно-измерительными приборами. Для достоверной оценки состояния изделий скалярные процессы измерений отдельных параметров объединяются в многомерные процессы [3], отражающие их известные стандартные характеристики.

В теории случайных процессов изменения свойств называют структурными разрывами (изменениями). В контексте испытаний физический смысл таких изменений связан с дефектами или поломками изделий: когда значения их диагностических параметров и, как следствие, стандартные характеристики функционирования отклоняются от номинальных, происходит нарушение связей, в том числе, статистических между параметрами.

С позиции статистического анализа при разрывах меняются: тип, среднее значение процесса, дисперсия, коэффициенты описывающей его параметрической модели. Для обнаружения этих изменений по текущим наблюдениям за значениями диагностических параметров могут быть использованы разработанные в последнее время алгоритмы последовательного анализа [4], когда каждый скалярный случайный процесс – элемент многомерного случайного процесса – анализируется после каждого нового наблюдения, и затем принимается решение о наличии либо отсутствии изменения его свойств. В основе анализа лежит процедура последовательной проверки гипотез. Первой проверяется нулевая гипотеза H_0 (плотность распределения процесса равна P_1) против альтернативной гипотезы H_1 (плотность распределения процесса равна P_2). Подавляющее большинство алгоритмов последовательного обнаружения разработано для случаев, когда функции распределения P до и после обнаружения различаются только своими параметрами: $P_1 = p(\theta_1) = p_{\theta_1}$, $P_2 = p(\theta_2) = p_{\theta_2}$ [4]. Необходимо по наблюдениям построить решающую функцию $g(y_1^{\tau})$, проверяющую в каждый момент получения очередного наблюдения, изменилось распределение процесса или нет, и определить момент остановки τ, когда принимается решение об изменении параметров распределения. Если $t_a < \tau$, то обнаружение истинно, и величина $\tau - t_a + 1$ называется запаздыванием в обнаружении, если $t_a > \tau$, то в момент τ происходит ложная тревога. Критерием качества является минимум времени запаздывания τ при заданном среднем времени до ложной тревоги T. Критерий (g, τ) называется последовательным критерием отношения вероятностей (ПКОВ) для проверки простой гипотезы $H_0 : P=P_1$ против альтернативной гипотезы $H_1 : P=P_2$, если в результате применения его к последовательности $y_1, y_2, \ldots, y_n, \ldots$ на каждом шаге проверяется $a < s_k^t < b$, где

$$s_k^t = \sum_{i=k}^{t} \ln \frac{f_{\theta_2}(s_i)}{f_{\theta_1}(s_i)} \qquad (1)$$

и $a,\ b$ – пороги такие, что $-\infty < a < b < \infty$, и принимается одно из следующих решений: справедлива гипотеза H_0, если $s_k^t \le a$; справедлива гипотеза H_1, если $s_k^t \ge b$; наблюдения продолжаются, если $a < s_k^t < b$. Качество статистического критерия оценивается вероятностями ошибок первого и второго рода:

$$\alpha_0 = P(g(y_1^N) \ne H_0 \big| H_0),$$

$$\alpha_1 = P(g(y_1^N) \ne H_1 \big| H_1),$$

где y_1^N – последовательность наблюдений $y_1,...,y_N$. Для оценки качества последовательного критерия используются характеристики: среднее время между ложными тревогами $E_1(\tau \big| \tau < t_a)$, среднее время задержки в обнаружении $E_2(\tau - t_a \big| \tau \ge < t_a)$. Величина этих характеристик зависит от выбираемых значений порогов *a, b*, значений параметров $\theta_1,\ \theta_2$ и заданного уровня достоверности, определяемого вероятностями $\alpha_0 = \dfrac{1-e^b}{e^a - e^b}$, $\alpha_1 = \dfrac{e^b(e^a-1)}{e^a - e^b}$ [4].

При известных параметрах $\Theta_1,\ \Theta_2$ до и после изменения свойств и неизвестном моменте изменения t_a на основе ПКОВ применяется алгоритм кумулятивных сумм (CUSUM). Алгоритм сводится к использованию в качестве нижнего порога $b=0$ и возобновлению ПКОВ всякий раз, когда s_k^t достигает нижнего порога, до тех пор, пока не будет превышен верхней порог a [4]. Момент изменения свойств определяется решением задачи:

$$\tau = \inf\left\{\tau \ge 1 : g = \max_{1 \le k < t} s_k^\tau \ge a\right\} \qquad (2)$$

Решающая функция g допускает рекуррентное представление:

$$g_t = \max(0, g_{t-1} + \ln \frac{f_{\theta_1}(y_t)}{f_{\theta_2}(y_t)}), \quad g_0 = 0.$$

Алгоритм можно представить набором ПКОВ, активизируемых в момент времени t с верхнем порогом a. До и после обнаружения алгоритм (1) – (2) обладает оптимальными свойствами в смысле минимума средней задержки обнаружения в "наихудшем случае"[4]

$$\tau = \sup_{t_a \ge 1} essSup E_{\theta_2}(t - t_a + 1 \big| y_1^{t_a}, t > t_a) \qquad (3)$$

при ограничении на минимальное время между ложными тревогами:

$$T = E_{\theta_1}(t \big| t < t_a) < \gamma \qquad (4)$$

где τ – момент обнаружения изменений, *ess* sup (*essential supremum*) – существенная верхняя грань, или супремум, по множеству всех аргументов кроме множества меры 0, или для "почти всех", $E_{\theta_i}(*)$ – математическое ожидание величины (*) при распределении $f_{\theta_i}(y_t), i = 1,2$. Среднее время задержки определяется для всех действительных θ_2 как:

$$E_{\theta_1}(\tau(\gamma)) \sim \frac{\ln(\gamma^{-1})}{K(\theta_2, \theta_1)}, \qquad (5)$$

$K(\theta_2, \theta_1)$ - информационная мера Кульбака-

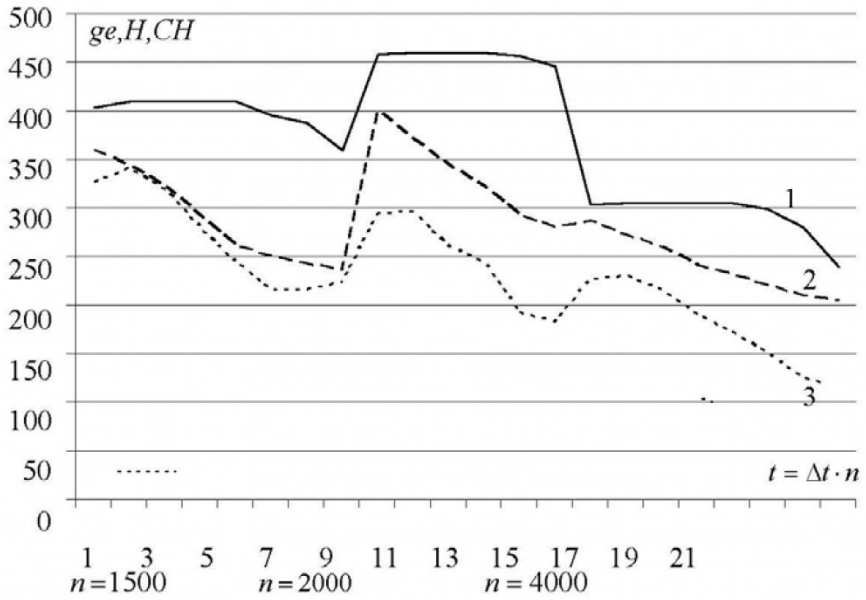

Рис. 1. Измерения параметров ДВС: 1 – разрежения во впускном коллекторе H (кПа); 2 - удельный расход топлива ge (кг/кВт·ч); 3 - содержание CH (млн$^{-1}$) в отработавших газах.

Лейблера:

$$K(\theta_i,\theta_j)=E_{\theta_i}\left[\ln\frac{f_{\theta_i}(y_t)}{f_{\theta_j}(y_t)}\right],\ i,j=1,2,\quad i\neq j \quad (6)$$

Описанный алгоритм последовательного анализа, однако, может быть заменен коинтеграционным анализом [2,3], когда изучается изменение свойств многомерного случайного процесса в целом: прослеживается сохранение или нарушение причинно-следственной зависимости между элементами. Сохранение такой зависимости (коинтеграционной связи) означает, что испытуемый объект приходит в рабочее состояние равновесия после произошедших в нем изменений, нарушение связей говорит серьезных изменениях объекта, связанных с поломками или дефектами.

В работах [2,3] описан алгоритм определения зависимостей между диагностическими параметрами, характеризующих работу карбюраторного двигателя внутреннего сгорания: удельного расхода топлива *ge (кг/rDn·ч)*, разрежения во впускном коллекторе *H* (*кПа*) и содержание *CH* (*млн*$^{-1}$) в отработавших газах (рис. 1). Получена зависимость между параметрами в виде линейной комбинации с коэффициентом, представляющим стационарную случайную величину. На этом основании исходные случайные процессы называются коинтегрированными, другими словами, их динамика одинакова.

Для сокращения длительности испытаний исключили измерения параметров, соответствующие частоте вращения коленчатого вала *n*=3000 *об/мин*, и для полученного многомерного случайного процесса построили векторную авторегрессионную модель:

$$x_t=\Pi_0+\Pi_1x_{t-1}+\ldots+\Pi_px_{t-1}+\varepsilon_t,\quad t=1,\ldots T, \quad (7)$$

где $x_t=\begin{pmatrix} ge_t \\ H_t \\ CH_t \end{pmatrix}$, $\Pi_0=\begin{pmatrix} 59{,}51 \\ 13{,}54 \\ 4{,}87 \end{pmatrix}$,

$$\Pi_1=\begin{pmatrix} 0{,}393 & 0{,}145 & 0{,}221 \\ -0{,}241 & 0{,}803 & 0{,}523 \\ -0{,}120 & 0{,}078 & 0{,}956 \end{pmatrix}.$$

Адекватность модели (7) подтверждена значениями ошибок оценивания коэффициентов и их автокорреляционных функций, демонстрирующих свойства «белого шума».

Коинтегрирующий вектор

$$\beta_{(1)}=(1.000,\ -0.761,\ 0.510,\ -132{,}3)^{\mathrm{T}}.$$

характеризует стационарную зависимость между указанными параметрами:

$$CH_t=4.623\,H_t-14.668\,ge_t+291.403$$

Последнее означает сохранение коинтеграционной связи, т.е. причинно-следственной зависимости между параметрами, что, в свою очередь, говорит об исправности испытуемого объекта. Этот вывод позволяет сократить длительность испытаний, т.к. алгоритм анализа экспериментальной информации допускает изменение свойств (разладку) процессов в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахметдзянов, А.М.* Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам / Н.Г. Дубравский, А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.

2. *Первухина, Е.Л.* Анализ нестационарных случайных процессов в задачах автоматизации производственных испытаний машиностроительных изделий / Голикова В.В.// Сборка в машиностроении, приборостроении, 2007. – №8. – С.29 – 35.

3. *Первухина, Е.Л.* Оценка состояния машиностроительных изделий в ходе производственных испытаний после сборки / П.К. Сопин, В.В. Голикова // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2009. – №10.

4. *Гребенюк Е.А*. Обнаружение изменений свойств нестационарных случайных процессов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №12. – С. 44 – 59.

Авторы статьи:

Первухина
Елена Львовна
- докт.техн.наук, проф. каф. технической механики и машиноведения (Севастопольский Национальный технический университет)
Тел. (0692) 23 51 61
E–mail: lena@pervuh.sebastopol.ua

Голикова
Виктория Викторовна
- канд.техн.наук., ст. преп. каф. технической механики и машиноведения. (Севастопольский Национальный технический университет)
Тел. (0692) 23 51 61
E–mail: golikova.victoria@gmail.com