

УДК 681.518.54

В.Ф. МИРГОРОД¹, Н.Д. БАГАУТДИНОВ², И.М. ГВОЗДЕВА³¹ОАО «Элемент», Украина²ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Украина³Одесский национальный политехнический университет, Украина

НОВЫЙ КРИТЕРИЙ РАЗЛИЧИЯ ТРЕНДОВ ДВУМЕРНЫХ ВЫБОРОК ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выполнена разработка и приведены результаты применения методов двумерного трендового контроля применительно к задаче диагностирования технического состояния газотурбинного двигателя в длительной эксплуатации. Предложены две трендовые статистики, разностная и новая двумерная типа Хальда-Аббе, позволяющие установить факт различия трендов в исследуемых временных рядах, при опорной гипотезе о наличии и идентичности трендов. Для разностной статистики ее свойства установлены в аналитическом виде, а для предлагаемой новой DR-статистики – методом статистического моделирования. Представлен пример двумерного трендового контроля для реальных данных эксплуатации газоперекачивающего агрегата.

Ключевые слова: техническая диагностика, статистическая модель, техническое состояние, трендовый контроль.

Введение

Переход к эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) по техническому состоянию, обусловленный требованиями нормативных документов и потребностями практики, формирует проблему усовершенствования программно-алгоритмического обеспечения систем технической диагностики (СТД) в направлении повышения надежности статистических выводов о фактическом состоянии диагностируемых объектов. Важные научно-практические задачи состоят в разработке таких алгоритмов диагностирования, которые обеспечивают минимизацию ложных решений на заданном уровне значимости.

Постановка проблемы и цель исследования. В современных СТД широко используются различные методы трендового контроля [1], позволяющие установить факт изменения технического состояния диагностируемых объектов по возникновению тренда в выборках данных параметров регистрации ГТД [2,3]. Практика их применения указывает на недопустимо высокий уровень ошибок второго рода («ложных тревог»), что приводит к необоснованному снятию объектов с эксплуатации, и, как следствие, снижению уровня доверия к надежности выводов СТД. Основной причиной этого является игнорирование естественного эксплуатационного тренда, поскольку большинство используемых трендовых статистик (исключая F-критерий И.В. Егорова) основаны на двухальтернативной гипотезе наличия

либо отсутствия тренда, причем опорной принимается именно последняя гипотеза. Разрешение указанного противоречия может быть достигнуто путем применения многомерных статистик различия трендов параметров регистрации, предполагающих наличие естественного, связанного с выработкой ресурса, трендов параметров при эксплуатации ГТД, а решение о наличии «разладки» принимается при установлении различия трендов.

Однако методы многомерного трендового контроля практически не рассматриваются в литературе, что требует развития исследований в указанном направлении.

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование двумерных статистик трендового контроля временных рядов, которые являются параметрами регистрации технического состояния ГТД в его жизненном цикле.

Основные результаты исследований

Естественным путем решения поставленной задачи является применение какого-либо из известных трендовых критериев, например, хорошо зарекомендовавшего себя на практике критерия Хальда-Аббе, к разностной выборке. Если трендовому контролю подлежат временные ряды $\{x_k\}$ и $\{z_k\}$ параметров регистрации, то различие трендов устанавливается по наличию тренда в разностной выборке $\{y_k\} = \{x_k - z_k\}$.

Критерий Хальда-Аббе формулируется в задачах обнаружения тренда в виде статистики [1]

$$r = \left[2 \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2 \right]^{-1} \sum_{k=1}^N (y_{k+1} - y_k)^2 > r_0, \quad (1)$$

где y_k – исследуемый временной ряд;
 r_0 – пороговое значение критерия;

$$\bar{y} = N^{-1} \sum_{k=1}^N y_k - \text{выборочное среднее.}$$

Опорной гипотезой H_0 является предположение об отсутствии тренда, при выполнении которой статистика (1) обычно [1] формируется в виде

$$r' = 0,5 \cdot \ln[(2-r)/r] > r'_0, \quad (2)$$

и при $N > 10$ нормализуется с дисперсией в виде

$$Dr' = 1/(N-3).$$

Поэтому уровни принятия гипотезы H_0 легко устанавливаются по их значимости для обычно применяемых в диагностике уровней $\alpha = 0,01; 0,05$.

Например, для часто применяемого значения $N=20$ эти уровни составляют

$$r'_{0,01} = 0,6306; \quad r'_{0,05} = 0,4729.$$

Недостатки рассматриваемого подхода к установлению различия трендов выборок на основе исследования свойств разностной выборки, обусловлены следующими факторами:

1) Разностная выборка может быть корректно сформирована только для параметров одной физической природы, а для разнородных параметров требуются предварительные процедуры центрирования и нормировки, что усложняет реализацию критерия.

2) Дисперсия разностной выборки по крайней мере в $\sqrt{2}$ раз больше дисперсий исходных, что ведет к росту уровня «ложных тревог».

Указанных недостатков лишена предлагаемая DR-статистика в виде

$$DR = 0,5 (\text{Var}_x \text{Var}_z)^{-1/2} \sum_{k=1}^N (x_{k+1} - z_k)(z_{k+1} - x_k), \quad (3)$$

где $\text{Var}_x, \text{Var}_z$ – выборочные дисперсии временных рядов $\{x_k\}$ и $\{z_k\}$.

Опорной гипотезой H_0 является предположение об идентичности трендов в исследуемых выборках, альтернативной о различии таковых.

В отличие от (1) предлагаемая статистика (3) при условии H_0 асимптотически стремится к нулю и не требует нелинейного преобразования (2), что упрощает ее численную реализацию.

Существенным отличием предлагаемой статистики является положенная в ее основу новая статистическая модель порождения данных. Отличие такой модели от общепринятых заключается в том, что исходно предполагается наличие тренда в выборках данных регистрации. Такой тренд может

быть следствием естественной выработки ресурса. При традиционном трендовом контроле одномерных временных рядов естественный тренд должен обязательно приводить к его обнаружению на некотором временном такте. Для парирования такого нежелательного эффекта ограничивают длину выборки и, тем самым, достигается компромисс между ее объемом и порогом срабатывания. Поскольку диагностируемые параметры взаимосвязаны, то тренд одного из них должен привести к тренду по другому параметру. Различие таких трендов означает нарушение характера взаимосвязи между параметрами ГТД, то есть возникновение неисправности.

Аналитическое исследование свойств предлагаемой статистики (состоятельность, эффективность и несмещенность) связано с исследованием композиции выборочных коэффициентов авто- и взаимокорреляции указанных временных рядов, поэтому связано с определенными трудностями. Поэтому такое исследование выполнено методом статистического эксперимента, первоначально на тестовых выборках, а затем на выборках реальных баз данных эксплуатации.

Тестовый эксперимент (рис. 1) заключался в формировании двух статистически независимых временных рядов (из нескольких сотен отсчетов), каждый из которых удовлетворяет гипотезе о принадлежности к генеральной совокупности независимых нормально распределенных случайных величин (СВ) на заданном уровне значимости, в которых, начиная с заданного момента времени, аддитивно формировался одинаковый линейный тренд. Сравнению подлежали разностная статистика в форме (2) и предлагаемая статистика.

На рис. 1 обозначены: сравниваемые выборки data1 и data2, пороговый уровень на 95 %-ой значимости K_v , разностная статистика r и предлагаемая статистика DR.

В результате статистического эксперимента установлено следующее:

– DR-статистика является асимптотически несмещенной, эффективной и состоятельной, при этом

$$\text{mean}(DR) \rightarrow 1/N, \quad (4)$$

$$\text{Var}(DR) \rightarrow a/N^2, \quad (5)$$

где $a = \text{const}$.

– DR-статистика асимптотически нормализуется (начиная примерно с 20-го отсчета), с моментами в виде (4) и (5),

– дисперсия DR-статистики, по крайней мере, в 4 раза меньше дисперсии сравниваемой разностной статистики в форме (2),

– быстродействие DR-статистики предположительно существенно выше по сравнению с традиционной.

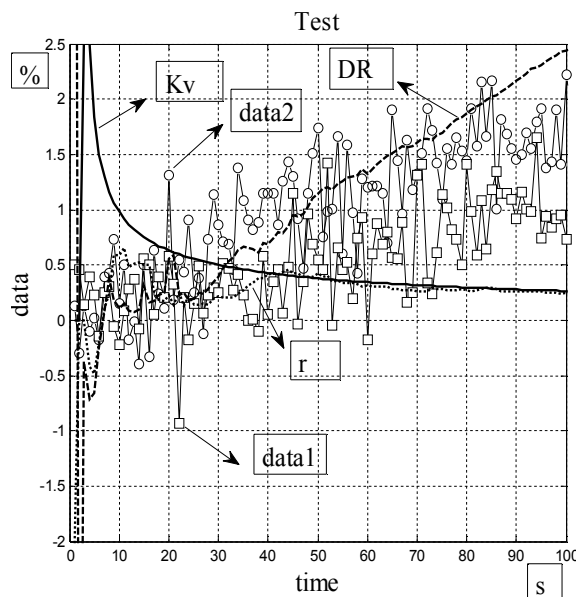


Рис. 1. Результаты тестового эксперимента

Наиболее важными являются последние три заключения, так как быстрая нормализуемость предлагаемой статистики позволяет установить ее квантили (по известным соотношениям), соответствующие заданным уровням значимости, существенное уменьшение дисперсии означает снижение уровня ошибок второго рода, а высокое быстродействие позволяет выявить раннее развитие различия трендов в выборках анализируемых параметров.

Возможности новой статистики сравнения трендов иллюстрирует рис. 2, на котором представлены выборки данных регистрации технического состояния ГПА НК-36СТ, заимствованные из [6], по параметрам $A_{\text{ГНД}}$ и ΔN , уровень срабатывания критериев различия трендов на заданном пороге значимости и реализации предлагаемой и сравниваемой статистик.

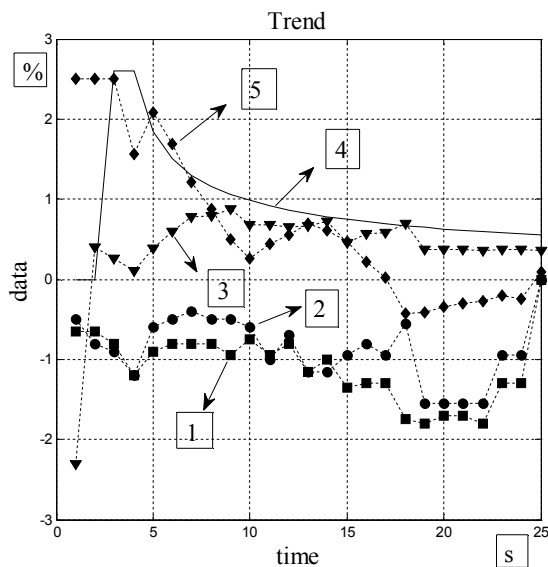


Рис. 2. Сравнение трендовых статистик

На рис. 2 обозначены: сравниваемые выборки $A_{\text{ГНД}}$ (реализация 1) и ΔN (реализация 2), пороговый уровень на 95 %-ой значимости (реализация 4), разностная статистика r (реализация 3) и предлагаемая статистика DR (реализация 5).

Как это следует из результатов трендового анализа тестовых и экспериментальных данных, и приведенных иллюстраций, предлагаемая статистика действительно имеет меньшее, по сравнению с разностной, время срабатывания, так как различие трендов выборок на 95 %-ом уровне значимости по DR-статистике фиксируется уже на пятом такте, в то время как по критерию (2) для разностной выборки только на пятнадцатом.

Заключение

Таким образом, предлагаемый DR-критерий различия трендов двумерных временных рядов имеет необходимые свойства трендовой статистики. Как это установлено математическим моделированием, предлагаемая статистика асимптотически нормализуется и имеет меньший, по сравнению с традиционными критериями, уровень «ложных тревог», и более высокое быстродействие.

Из проводимых исследований, результатов сопоставительного анализа и численного моделирования следуют предлагаемые выводы и рекомендации.

1. Эффективность критериев тренда, в частности Хальда-Аббе, существенно зависит от статистических свойств тестируемой выборки: справедливости гипотез о некоррелированности и принадлежности к нормальной генеральной совокупности, надежность которых целесообразно установить в результате предварительного разведочного анализа данных.

2. Для предварительной оценки возможности использования выбранной статистики тренда целесообразно определить общие статистические свойства (тип статической модели) исследуемого временного ряда на основе одного из критериев Фишера, либо процедуры Кохрейна.

3. Существенное повышение эффективности статистик тренда может быть достигнуто путем предварительного сингулярного разложения траекторий матрицы, образованной временным рядом [4]. При таком разложении могут быть выделены трендовые компоненты временных рядов, содержащих циклические составляющие.

4. Для повышения достоверности статистических выводов об отсутствии тренда необходимо предварительное построение диагностических моделей исследуемых процессов в ГТД, а также тщательная оценка метрологических свойств измерительных каналов, включая алгоритмы цифровой

филтрации данных и оценку вероятностных характеристик ошибок измерений.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в аналитическом обосновании свойств DR-статистики и распространении результатов исследований на многомерные временные ряды. Требуется также обоснование реалистичных статистических моделей исследуемых временных рядов для конкретных прикладных задач диагностирования технического состояния газотурбинных двигателей.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, В.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
2. Елисеев Ю.С. Статистические методы формирования алгоритмов вычисления в полете тяги и других основных параметров газотурбинного двигателя, критериев и признаков технического состояния его узлов / Ю.С. Елисеев, Г.В. Добрянский, Т.Ф. Дема // *Авиационно-космическая техника*

и технология. – 2003. – № 6(41). – С. 81-89.

3. Егоров И.В. Диагностирование технического состояния авиационных двигателей / И.В. Егоров // *Труды ЦИАМ «Научный вклад в создание авиационных двигателей».* – М.: Машиностроение, 2000. – С. 651-688.

4. Миргород В.Ф. Применение диагностических моделей и методов трендового анализа для оценки технического состояния газотурбинных двигателей / В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко, В.М. Кравченко // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2008. – № 9(56). – С. 192-197.

5. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

6. Эксплуатация автоматизированных систем диагностирования АСД-36СТ и АСД-38СТ газотурбинных приводов НК-36СТ и НК-38СТ на компрессорных станциях / В.Б. Коротков, Ю.К. Криволицкий, В.Н. Михнович и др. // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2003. – Вып. 7 (42). – С. 105-107.

Поступила в редакцию 1.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Г. Антошук, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.

НОВИЙ КРИТЕРІЙ ВІДМІННОСТІ ТРЕНДІВ ДВОВИМІРНИХ ВИБІРОК ПАРАМЕТРІВ РЕЄСТРАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

В.Ф. Миргород, Н.Д. Багаутдинов, І.М. Гвоздева

Виконано розробку та наведено результати застосування методів двовимірного трендового контролю стосовно до задачі діагностування технічного стану газотурбінного двигуна у тривалій експлуатації. Запропоновано дві трендові статистики, різницева і нова двовимірна типу Халден-Аббе, що дозволяють встановити факт відмінності трендів у досліджуваних часових рядах, при опорній гіпотезі про наявність та ідентичності трендів. Для різницевої статистики її властивості встановлені в аналітичному вигляді, а для пропонованої нової DR-статистики - методом статистичного моделювання. Представлено приклад двовимірного трендового контролю для реальних даних експлуатації газоперекачувального агрегату.

Ключові слова: діагностика, статистична модель, технічний стан, трендовий контроль.

NEW CRITERION FOR TRENDS DISTINCTION OF BIDIMENTIONAL RETRIEVAL OF REGISTRATION PARAMETERS OF GAS TURBINE ENGINES TECHNICAL STATE

V.F. Mirgorod, N.D. Bagautdinov, I.M. Gvosdeva

Design is executed and application results of methods of two-dimensional trend control conformably to a problem of technical state diagnosing of gas turbine engine during continuous exploitation. Two trend statistics, difference and new two-dimensional Hald – Abbe type, which allow to determine the fact of trends distinction in researched time series at a basic hypothesis about presence and identity of trends are offered. For difference statistics property are determined in an analytical mode, and for offered new DR-statistics - by a method of statistical modeling. The example two-dimensional trend control for real data of gas turbine engine operation is presented.

Key words: diagnostics, statistical mode, technical state, trend control.

Миргород Владимир Федорович – канд. техн. наук, доцент, заместитель директора по научной работе, ОАО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Багаутдинов Наиль Дахиевич – ведущий конструктор ГП ЗМКБ «Ивченко – Прогресс», Запорожье, Украина.

Гвоздева Ирина Маратовна – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина, e-mail: onophenko@mail.ru.