

УДК 629.4.001.4

С.В. ЕПИФАНОВ<sup>1</sup>, Б.А. ЩЕРБАНЬ<sup>1</sup>, Ю.В. ЧЕРКАСОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>Государственное предприятие «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро им. академика А.Г. Ивченко «Прогресс», Запорожье, Украина

## ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ КРИТЕРИЕВ ТРЕНДА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АЛГОРИТМАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

*Анализ трендов диагностических признаков систем и узлов двигателей позволяет обнаружить неисправности на ранней стадии. Для организации алгоритмического тренд-анализа необходимо выполнить исследование альтернативных критериев и выбрать наиболее эффективные из них. В качестве критерия эффективности рассматривается запаздывание обнаружения тренда при одинаковой для всех критериев вероятности ложных отказов. С помощью имитационного моделирования выполнен сравнительный анализ наиболее распространенных критериев тренда. Изучено влияние различных способов сглаживания на их эффективность. Выбраны наиболее эффективные критерии для дальнейшего применения в алгоритмах параметрической диагностики газотурбинных двигателей.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, параметрическая диагностика, эксплуатация по состоянию, тренд-анализ, критерий тренда, имитационное моделирование, сглаживание.

### Введение

Одной из тенденций в развитии авиационной техники является переход к ее эксплуатации по состоянию с целью сокращения затрат на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт путем наиболее полного использования технических возможностей, что были заложены на этапе проектирования [1]. Эксплуатация по состоянию обеспечивается проведением необходимого объема технического диагностирования отдельных объектов, а также систематическим контролем уровня надежности всего эксплуатируемого парка однотипных летательных аппаратов с учетом особенностей их применения [2].

При этом необходимо не просто констатировать факт наличия неисправности, но и выявить ее на ранней стадии, когда объект диагностирования не только работоспособен, но и исправен. Этой задаче соответствует тренд-анализ – направление параметрической диагностики, выявляющее возможные тенденции отклонения параметров ГТД от их нормальных значений [3].

В США контроль тренда параметров по наработке, согласно требованиям FAA, обязателен для авиационных ГТД, сертифицированных по программе ETOPS [4]. Необходимость соответствия отечественных ГТД мировым стандартам качества требует проведения исследовательских работ с целью разработки эффективных методик оценки их технического состояния.

Методики автоматизированного (алгоритмического) тренд-анализа параметров ГТД применяются уже более 35 лет, однако систематический анализ критериев и алгоритмов с учетом особенностей данной области применения выполнялся редко. Наиболее представительными работами в данном направлении можно считать [3, 4, 18 – 20]. Накопление опыта диагностирования и развитие средств регистрации и обработки эксплуатационной информации выявляют недостатки принятых ранее решений и неполноту выполненного ранее анализа и стимулируют дальнейшее совершенствование алгоритмов тренд-анализа.

Данную работу можно считать развитием предыдущего исследования [3]. Необходимость такого развития определяется такими обстоятельствами:

1. В практике диагностирования двигателей появились новые, ранее не рассмотренные критерии.

2. В качестве показателя эффективности критериев тренд-анализа было принято рассматривать запаздывание обнаружения тренда, которое определялось как среднее значение, полученное в серии имитационных выборок. В данном исследовании также используется этот показатель, однако он рассматривается как случайная величина, для которой определяются и анализируются два параметра – оценки математического ожидания и дисперсии.

Ранее для параметрических критериев выполнен анализ влияния неточности задания параметров процесса на эффективность обнаружения тренда. Этот анализ можно считать началом проверки еще

одного свойства критериев – робастности, то есть устойчивости к отличиям реального анализируемого процесса от идеального, для которого выполнено сравнительное исследование и настройка критериев. В данном исследовании проанализировано также влияние предварительного сглаживания и сбоев в исходных данных.

## 1. Описание критериев

В настоящее время в практике диагностирования используются десятки критериев тренда. Их можно разделить на две группы: параметрические и непараметрические. Параметрические критерии используют априорную информацию, непараметрические – не используют.

Можно также выделить три основные задачи математической статистики, решаемые критериями тренда [3]: оценка случайности расхождения между математическим ожиданием параметра и выборочным средним (эти критерии, как правило – параметрические, так как требуют наличия априорной информации об анализируемом процессе – его среднеквадратического отклонения  $\sigma_Y$ ); оценка принадлежности двух выборок одной генеральной совокупности (эти критерии, как правило – непараметрические, так как для их применения достаточно и апостериорной информации, полученной в результате измерений); выявление закономерностей в последовательности данных на основе оценки стационарности временного ряда и взаимной корреляции измерений.

Для дальнейшего исследования были выбраны следующие критерии, которые используются различными авторами для анализа изменения параметров двигателей в эксплуатации.

### 1.1. Интегральный S-критерий

Интегральный S-критерий – параметрический критерий, оценивающий отклонение текущего измерения  $Y_i$  от его математического ожидания [3]:

$$S_i = \sum_{k=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i) > S_{lim,i}, \quad (1)$$

где  $\bar{Y}_i = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i Y_k$  – выборочное среднее значение.

Пороговый уровень критерия  $S_{lim,i}$  – двусторонний, требует априорного знания значения  $\sigma_Y$  и зависит от номера измерения  $i$  и толерантного коэффициента  $K_\alpha$ , который определяется законом распределения случайного процесса  $Y_i$  и принятой вероятностью ложного срабатывания  $\alpha$ . При нор-

мальном законе распределения уровню  $\varepsilon = 5\%$  соответствует значение  $K_\alpha = 1,96$ :

$$S_{lim,i} = \pm K_\alpha \sigma_Y \sqrt{\sum_{k=1}^i \left( 1 - \sum_{j=1}^{i-k+1} \frac{1}{i-j+1} \right)^2}. \quad (2)$$

Как видно из формулы (1), этот критерий может обрабатывать выборку, начиная с первого измерения.

### 1.2. r-критерий Хальда-Аббе

r-критерий Хальда-Аббе – непараметрический критерий, оценивающий отношение квадрата отклонения последовательных измерений к выборочной дисперсии [3, 5, 6, 15]:

$$r_i = \frac{\frac{1}{2(i-1)} \sum_{i=1}^n (Y_{i+1} - Y_i)^2}{\frac{1}{i-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_n)^2} < r_{lim,i}. \quad (3)$$

Пороговый уровень r-критерия – односторонний, зависит от номера измерения  $i$  и принятой вероятности ложного срабатывания (вероятности  $\varepsilon = 5\%$  соответствует значение  $K_\alpha = 1,645$ ):

$$r_{lim,i} = 2 - 2 \cdot K_\alpha \sqrt{\frac{i-2}{(i-1)(i+1)}}. \quad (4)$$

Как видно из (3), r-критерий может обрабатывать выборку начиная с третьего измерения.

### 1.3. t-критерий Стьюдента

t-критерий Стьюдента для разности пар – непараметрический критерий, проверяющий отношение среднего значения разностей пар  $\bar{d}_i$  двух связанных рядов измерений  $X_i$  и  $Y_i$  к их выборочному среднеквадратическому отклонению  $\sigma_{\bar{d}_i}$  [6]:

$$t_i = \frac{\bar{d}_i}{\sigma_{\bar{d}_i}} > t_{lim,i}. \quad (5)$$

Пороговый уровень t-критерия – двусторонний, зависит от соответствующего квантиля t-распределения и принятой вероятности ложного срабатывания (вероятности  $\varepsilon = 5\%$  соответствует значение  $K_\alpha = 1,96$ ):

$$t_{lim,i} = \pm K_\alpha t_{i-1;\alpha}. \quad (6)$$

Как видно из (5), t-критерий может обрабатывать выборку начиная со второго измерения.

### 1.4. Ф-критерий

Ф-критерий анализирует последовательность измерений с целью выявления возможной нестационарности во временном ряду [4, 7]:

$$\Phi = 0,5 \cdot \ln \frac{1 - \gamma_i}{1 + \gamma_i} > \Phi_{\text{lim},i}. \quad (7)$$

Преобразование Фишера  $\Phi$  используется для сведения распределения коэффициента автокорреляции  $\gamma_i$  к нормальному. В работах [4, 7] предложено определять коэффициент автокорреляции  $\gamma_i$  по методу Юла-Уолкера [8]:

$$\gamma_i = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)(Y_{i+1} - \bar{Y}_i)}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}. \quad (8)$$

При расчете коэффициента автокорреляции по экспериментальным данным нами было выявлено, что метод Юла-Уолкера не гарантирует выполнения обязательного условия  $-1 < \alpha_i < +1$ , поэтому в дальнейшем при сравнительном анализе критериев коэффициент автокорреляции рассчитывался нами методом Пирсона [9]:

$$\gamma_i = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)(Y_{i+1} - \bar{Y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_{i+1} - \bar{Y}_i)^2}}. \quad (9)$$

Этот способ, хоть и является более громоздким, гарантирует выполнение указанного условия. Пороговый уровень  $\Phi$ -критерия – односторонний, зависит от номера измерения и принятой вероятности ложного срабатывания (вероятности  $\varepsilon = 5\%$  соответствует значение  $K_\alpha = 1,96$ ):

$$\Phi_{\text{lim},i} = K_\alpha \frac{1}{\sqrt{i-3}}. \quad (10)$$

Как видно из (10),  $\Phi$ -критерием можно обрабатывать данные начиная с четвертого измерения.

### 1.5. Кумулятивный коэффициент Байеса

В работе [10] предложена универсальная методика отсева ошибок измерений, обнаружения тренда параметров и прогнозирования развития неисправности, основанная на сочетании метода Байеса [6] с линейной динамической моделью [3]. Текущее измерение сравнивается с альтернативной моделью, в которой среднее значение изначально смещено на величину  $h = k \cdot \sigma_Y$ . Если прогнозируемое распределение совпадает с альтернативной моделью, то обнаружено возможное изменение технического состояния объекта.

Используемый в алгоритмах коэффициент Байеса определяется по формуле

$$H_i = \exp \left( \frac{\text{sign}(Y_i) \cdot 2h(Y_i - \bar{Y}_i) - h^2}{2\sigma_Y^2} \right), \quad (11)$$

$$\text{где } \text{sign}(Y_i) = \begin{cases} +1, & Y_i \geq 0; \\ -1, & Y_i < 0. \end{cases}$$

Кумулятивный коэффициент Байеса определяется как произведение последовательности рассчитанных по формуле (11) коэффициентов Байеса:

$$H_i(k) = \prod_{i=1}^n H_i. \quad (12)$$

Если  $H_i > H_{\text{min}}$ , значение считается сбойным. Тренд считается выявленным, если условие  $H_i(k) > H_{\text{min}}$  выполняется  $1 \geq 4$  раза подряд. Этим критерием можно обрабатывать данные, начиная с первого измерения.

### 1.6. Критерии, основанные на методе экспоненциального сглаживания

Нами были исследованы два критерия, основанные на методе экспоненциального сглаживания – D-критерий [11] и E-критерий [12]. Эти критерии являются параметрическими, поскольку их пороговый уровень зависит от дисперсии случайной величины. D-критерий определяется по формуле

$$D_i = \beta \cdot \Delta \bar{Y}_i + (1 - \beta) \cdot \Delta \bar{Y}_{i-1} > D_{\text{lim}}, \quad (13)$$

где  $\Delta \bar{Y}_i = \bar{Y}_{i+1} - \bar{Y}_i$  – разность  $i$ -й пары последовательных сглаженных значений  $\bar{Y}_i$ ;  $\beta$  – коэффициент сглаживания.

E-критерий определяется по формуле

$$E_i = \left( \bar{Y}_i - \bar{Y}_i^{(2)} \right) \frac{\beta}{1 - \beta} > E_{\text{lim}}, \quad (14)$$

где  $\bar{Y}_i$  – значение сглаженной выборки;  $\bar{Y}_i^{(2)}$  – значение повторно сглаженной выборки.

Пороговый уровень обоих критериев – двухсторонний, зависит от принятой вероятности ложного срабатывания (вероятности  $\varepsilon = 5\%$  соответствует значение  $K_\alpha = 1,96$ ) и выборочной дисперсии сглаженной выборки  $\sigma_{\bar{Y}}$ :

$$D_{\text{lim}} = E_{\text{lim}} = \pm K_\alpha \sigma_{\bar{Y}}. \quad (15)$$

Данный критерий может обрабатывать данные начиная со второго измерения.

### 1.7. Модифицированный $r'$ -критерий

Данный критерий, связанный с  $r$ -критерием Хальда-Аббе (разд. 1.2), был разработан с целью возможности сведения распределения случайной величины к нормальному [6]:

$$r'_i = \frac{1}{2} \ln \frac{2 - r_i}{r_i} < r'_{\text{lim}}. \quad (16)$$

Пороговый уровень определяется толерантным коэффициентом  $K_\alpha$  и среднеквадратическим отклонением случайной величины  $\sigma_{r'}$ :

$$r'_{lim} = K_\alpha \sigma_{r'} = K_\alpha \frac{1}{\sqrt{i-3}}. \quad (17)$$

Как видно из (16), область определения модифицированного  $r'$ -критерия определяется условием  $r_i > 2$ . Пороговый уровень  $r$ -критерия (4) достигает значения  $r_{lim} = 2$  лишь при  $i = 10^{14}$  измерений, поэтому для реальных объемов выборок при  $r \geq 2$  тренд отсутствует.

## 2. Методика сравнительного исследования критериев

### 2.1. Имитация исходных данных

В качестве основной характеристики критериев рассматривалось запаздывание обнаружения тренда. Этот параметр рассматривался как случайная величина, поэтому для ее анализа требовалось получить достаточное количество статистических данных.

Для корректности сравнения эффективности критериев необходимо выполнение двух условий. Во-первых, результат сравнения должен быть получен при обработке одинакового количества выборок, содержащих тренд со сходными показателями. Во-вторых, необходимо обеспечить одинаковый уровень вероятности ложных срабатываний критериев в условиях отсутствия тренда.

С целью получения достаточного количества статистических данных использовалось имитационное моделирование. Исходная выборка представляла собой линейный тренд с постоянным заданным значением темпа тренда  $a$ , которому предшествовал прямой участок с постоянной продолжительностью  $t_0$  (рис. 1).

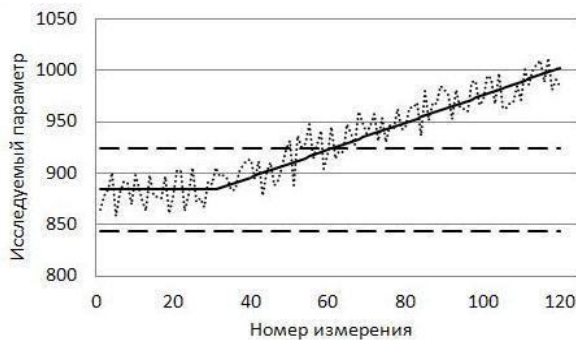


Рис. 1. Имитация тренда

Длина выборки  $n = 150$ , длина начального участка  $t_0 = 30$ , длина обучающего участка  $n_{баз} = 15$  измерений. Дальнейшее увеличение длины выборки,

с одной стороны, невозможно по причине ограниченных возможностей используемого программного обеспечения, а с другой стороны – бессмысленно, поскольку при  $n > 100$  длина выборки практически не влияет на результат (рис. 2).

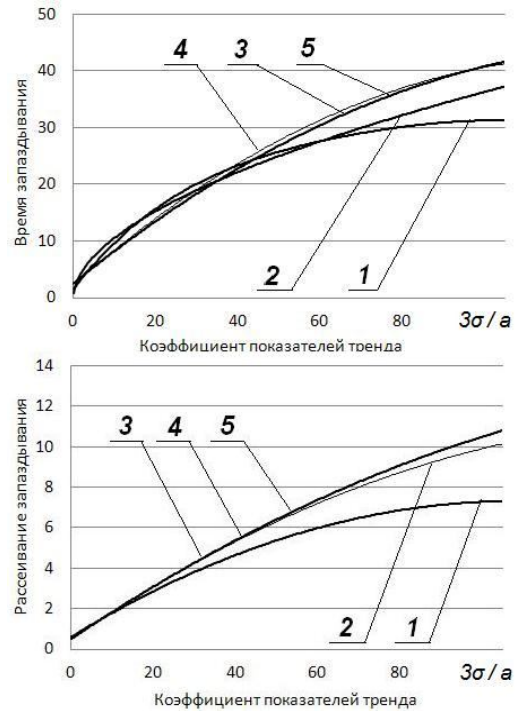


Рис. 2. Влияние размера выборки на результат исследования интегрального S-критерия:  
1 –  $n = 60$ ; 2 –  $n = 80$ ; 3 –  $n = 100$ ;  
4 –  $n = 120$ ; 5 –  $n = 150$

При исследовании каждого из критериев было выполнено  $n_{итер} = 250$  итераций, в ходе которых одновременно генерировалось 16 выборок с различными значениями  $\sigma_Y$  в диапазоне  $0,025 \dots 35,0$  и постоянным темпом тренда  $a$ .

Для «зашумления» выборки использовался генератор случайных чисел, реализованный с помощью языка программирования Fortran 6.6.b. Встроенный генератор случайных чисел URAND имеет погрешность при «зашумлении» выборки. Погрешность постоянная, не зависит ни от  $\sigma_Y$ , ни от  $n$ .

Поэтому нами был определен и в дальнейшем использован коэффициент коррекции генератора случайных чисел  $k_{ГСЧ} = 1,4$ .

Второе условие корректности сравнения – одинаковый уровень ложных срабатываний критерия. Под ложным срабатыванием понимается ошибочное выявление тренда. С этой целью пороговые уровни всех исследуемых критериев были настроены на вероятность ошибки  $\varepsilon = 5\%$ . Для этого в структуру пороговых уровней были введены коэффициенты коррекции  $k_{кор}$ , значения которых были подобраны

на основании статистики, собранной при обработке выборок, не содержащих тренд.

## 2.2. Показатели эффективности критериев тренда

В работе [3] предложено сравнительное исследование эффективности критериев тренда исходя из их запаздывания.

Под запаздыванием (быстродействием)  $\Delta\tau_{\text{зап}}$  следует понимать число шагов от момента начала тренда до момента его обнаружения критерием. В качестве оценки  $\Delta\tau_{\text{зап}}$  использовано среднее значение времени с момента появления тренда до момента его обнаружения.

В работе [13], которая является продолжением работы [3] предложено рассматривать запаздывание обнаружения тренда как случайную величину и, кроме исследованных ранее оценок ее математического ожидания, введен еще один параметр распределения времени запаздывания – дисперсия запаздывания  $\sigma_{\Delta\tau_{\text{зап}}}$ . В качестве ее оценки  $\sigma_{\Delta\tau_{\text{зап}}}$  использовано среднееквадратическое отклонение.

В работе [3] с использованием теории размерностей также показано, что для задачи обнаружения линейного тренда все влияющие факторы можно объединить в безразмерный комплекс  $K = k \cdot \sigma_Y / a$ , который в дальнейшем будем называть коэффициентом показателей тренда.

Вместо времени запаздывания можно рассматривать безразмерный комплекс, равный отношению времени запаздывания к среднему интервалу наблюдения (что в случае равных интервалов наблюдения соответствует количеству интервалов запаздывания). В данном исследовании было принято  $k = 3$ .

По сравнению с ранними работами авторов [3, 13] был расширен диапазон  $K = 0 \dots 110$ , выросло количество используемых выборок – каждая расчетная точка на рис. 11 – 16, 19, 20 получена на основании обработки  $n = 250$  выборок с одинаковым значением  $\sigma_Y$  и  $a$ . Как отмечено в работе [13], интервал до начала тренда  $t_0$  практически не влияет на  $\Delta\tau_{\text{зап}}$  и  $\sigma_{\Delta\tau_{\text{зап}}}$ , поэтому в данной работе рассматриваться не будет.

## 2.3. Интерпретация результатов

Ложным срабатыванием критерия считается получение сигнала об обнаружении тренда на участке  $t_0$ , либо при обработке выборки без тренда, с параметром  $a = 0$ .

Если критерию не удалось обнаружить тренд

на заданном интервале измерений  $n = 120$ , фиксировалось невыявление тренда.

Тренд считался выявленным лишь тогда, когда критерий превышал свой пороговый уровень более 10 раз подряд. Единичные превышения критерием порогового уровня не считались сигналами о выявлении тренда.

## 3. Сравнение эффективности критериев

Целью сравнения эффективности критериев был выбор наиболее эффективного критерия для дальнейшего применения в составе наземного комплекса параметрической диагностики. Помимо этого ставилась задача уточнить аналогичные результаты, изложенные в ранних работах авторов [3, 13], и исследовать новые критерии.

Критерии, использующие различные методы выявления тренда, сравнивались отдельно. Среди параметрических критериев (рис. 3) наибольшую эффективность (минимальное запаздывание при минимальном рассеивании) продемонстрировал интегральный S-критерий. Основанные на экспоненциальном сглаживании параметрические D-критерий и E-критерий существенно уступают за счет большего запаздывания и рассеивания. Это подтверждает результат, приведенный в [3].

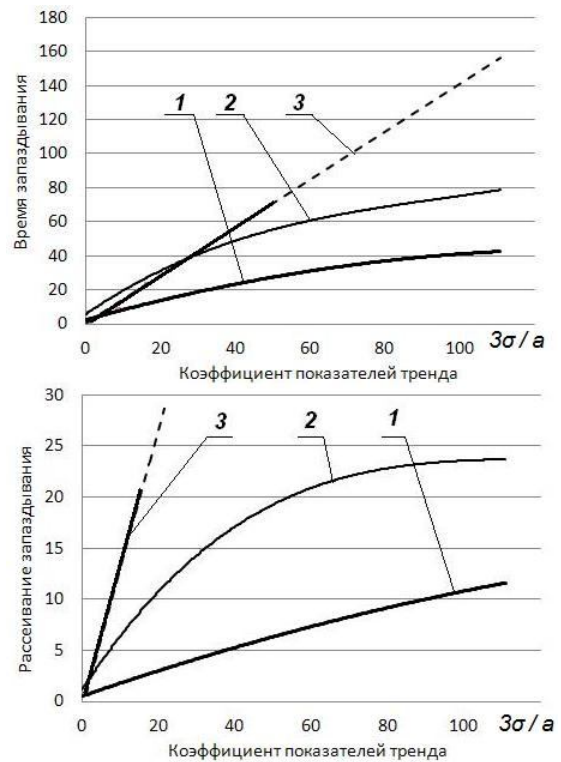


Рис. 3. Показатели эффективности параметрических критериев:  
1 – интегральный S-критерий;  
2 – D-критерий; 3 – E-критерий

Среди непараметрических критериев (рис. 4) наибольшую эффективность продемонстрировал критерий Стьюдента для разности пар. Модифицированный  $g'$ -критерий позволил несколько снизить рассеивание запаздывания по сравнению с  $g$ -критерием Хальда-Аббе и  $\Phi$ -критерием, но само запаздывание существенно увеличилось. Коэффициент Байеса, безусловно, является эффективным способом выявления ошибок измерений и сбойных значений, но для задачи выявления трендов он малоприменим.

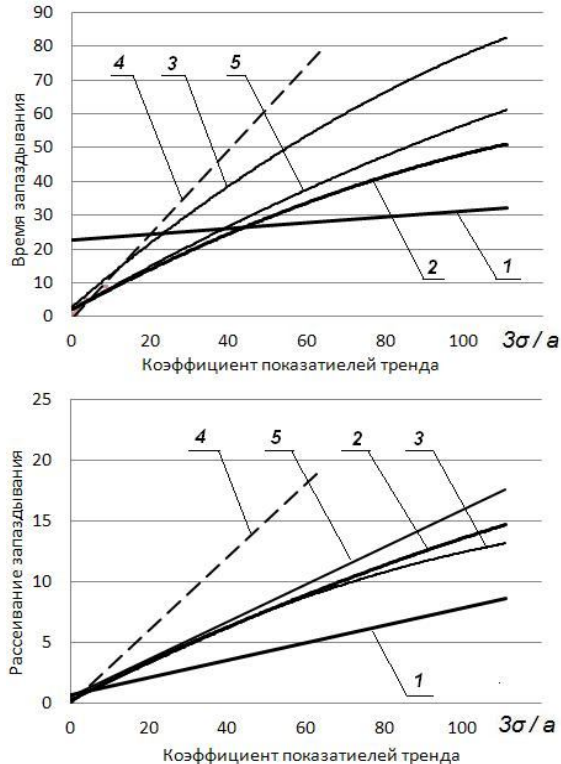


Рис. 4. Показатели эффективности непараметрических критериев:

- 1 –  $t$ -критерий Стьюдента для разности пар;
- 2 –  $g$ -критерий Хальда-Аббе;
- 3 – модифицированный  $g'$ -критерий;
- 4 – критерий Байеса; 5 –  $\Phi$ -критерий

Следующим этапом исследования стало сравнение наиболее эффективных критериев параметрического интегрального  $S$ -критерия и непараметрического  $t$ -критерия Стьюдента для разности пар с  $\Phi$ -критерием (рис. 5), применяющимся в действующих алгоритмах параметрической диагностики ГТД. Очевидно, что  $\Phi$ -критерий [4], анализирующий постоянство временного ряда, значительно уступает в быстродействии и точности интегральному  $S$ -критерию и  $t$ -критерию Стьюдента для разности пар.  $t$ -критерий имеет меньшее по сравнению с интегральным  $S$ -критерием рассеивание запаздывания, но существенно уступает ему в быстродействии в диапазоне показателя  $K = 0...50$ .

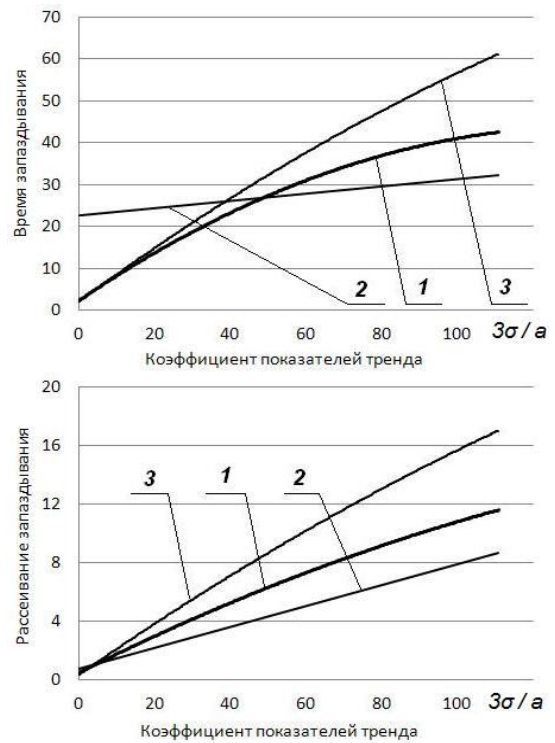


Рис. 5. Эффективность выявления тренда:

- 1 – интегральный  $S$ -критерий;
- 2 –  $t$ -критерий Стьюдента для разности пар;
- 3 –  $\Phi$ -критерий

#### 4. Исследование влияния сглаживания

Процедура сглаживания выборки, позволяющая снизить среднеквадратическое отклонение случайной величины, является этапом многих реализованных алгоритмов параметрической диагностики.

Ранее авторами проведена работа [14] по сравнению эффективности различных методик сглаживания: экспоненциального сглаживания [12], метода Холта [16] и метода Керенского [17].

Методы Холта и Керенского были разработаны на основе экспоненциального сглаживания с целью прогнозирования дальнейшего изменения случайной величины. Оба метода содержат сигнал Тригга,  $0 < B < 1$ , связывающий абсолютную и сглаженную ошибку прогноза [17]. Его значение может быть расчетным и определяться заново для каждого нового измерения (далее  $B$ -расчетное), а может задаваться постоянным (далее –  $B = \text{const}$ ). С целью регулирования снижения  $\sigma_Y$  было изучено влияние  $\alpha$  и  $B$  на снижение  $\sigma_Y$ . На рис. 6 приведен результат сравнения эффективности снижения  $\sigma_Y$  с помощью экспоненциального сглаживания, методов Холта и Керенского с постоянным и расчетным сигналом Тригга. Результаты получены на основании обработки выборок без тренда с  $\sigma_Y = 0,035...50,0$  при постоянном значении коэффициента сглажива-



ния  $\alpha = 0,1$ . Снижение  $\sigma_Y$  оценивалось как

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{исх} - \sigma_{сгл}}{\sigma_{исх}} \cdot 100\% \quad (18)$$

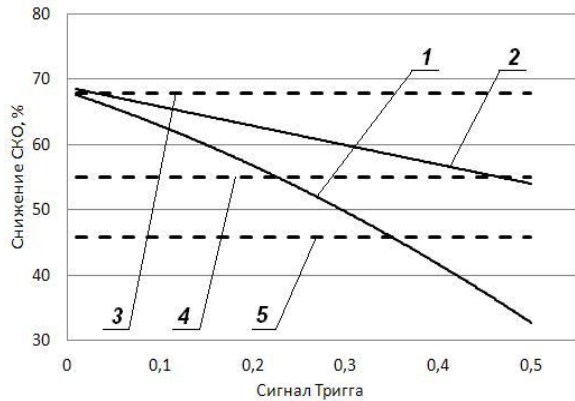


Рис. 6. Влияние сигнала Тригга В: 1 – метод Холта,  $V=const$ ; 2 – метод Керенского,  $V=const$ ; 3 – экспоненциальное сглаживание; 4 – метод Керенского,  $V$ -расчетное; 5 – метод Холта,  $V$ -расчетное

Аналогично было оценено влияние коэффициента сглаживания. Коэффициент снижения среднеквадратического отклонения определен как:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{сгл}}{\sigma_{исх}} \quad (19)$$

Экспоненциальное сглаживание выборки не позволило повысить эффективность критериев. При обработке сглаженных выборок параметрическим интегральным S-критерием его среднее время запаздывания  $\Delta\tau_{зап}$  и рассеивание запаздывания  $\sigma_{\Delta\tau}$  увеличились (рис. 7). Уровень ложных срабатываний не превысил установленный предел  $\varepsilon = 5\%$ .

Непараметрические t-критерий Стьюдента и Ф-критерий непригодны для обработки сглаженной выборки из-за высокой склонности к ложным срабатываниям. Сглаживание методом Холта также приводит к снижению показателей эффективности интегрального S-критерия (рис. 8). При этом, учет ошибки прогноза позволяет повысить быстродействие и снизить рассеивание по сравнению с простым экспоненциальным сглаживанием.

Сглаживание методом Керенского (рис. 9) позволяет увеличить быстродействие интегрального S-критерия при  $V > 0,6$ , правда, ценой увеличения рассеивания примерно в 1,5 раза. Сглаживание при  $V < 0,3$  приводит к снижению обоих показателей эффективности критерия. Использование расчетного В увеличивает рассеивание  $\sigma_{\Delta\tau_{зап}}$ , а быстродействие сопоставимо с результатом обработки несглаженной выборки.

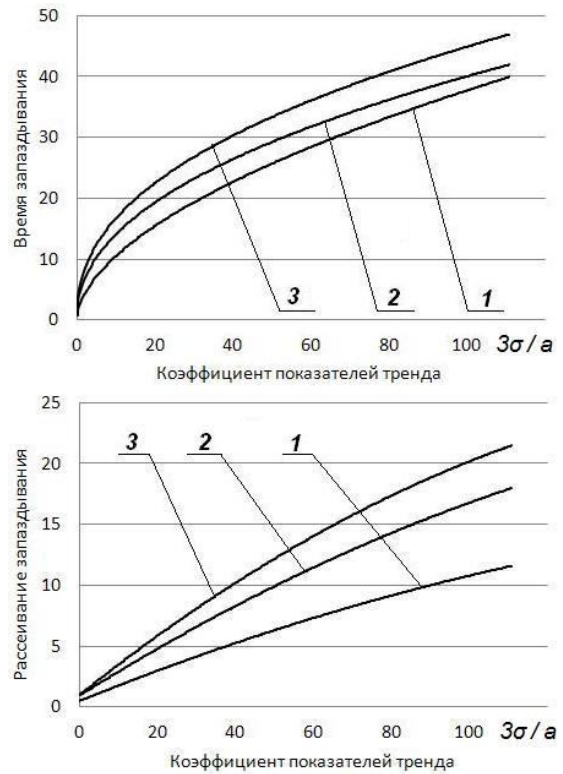


Рис. 7. Влияние экспоненциального сглаживания на свойства интегрального S-критерия: 1 –  $\alpha = 1,0$ ; 2 –  $\alpha = 0,2$ ; 3 –  $\alpha = 0,1$

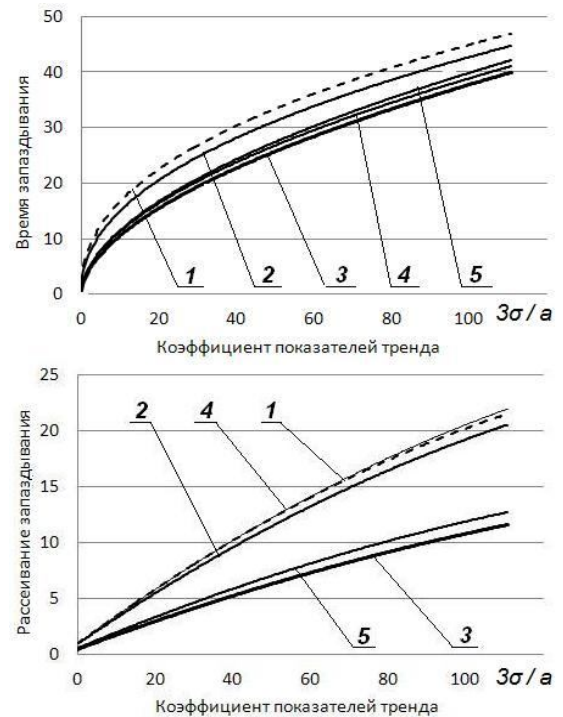


Рис. 8. Влияние сглаживания методом Холта на эффективность интегрального S-критерия: 1 – экспоненциальное сглаживание; 2 – метод Холта,  $V = 0,1$ ; 3 – несглаженная выборка; 4 – метод Холта,  $V$ -расчетное; 5 – метод Холта,  $V = 0,7$

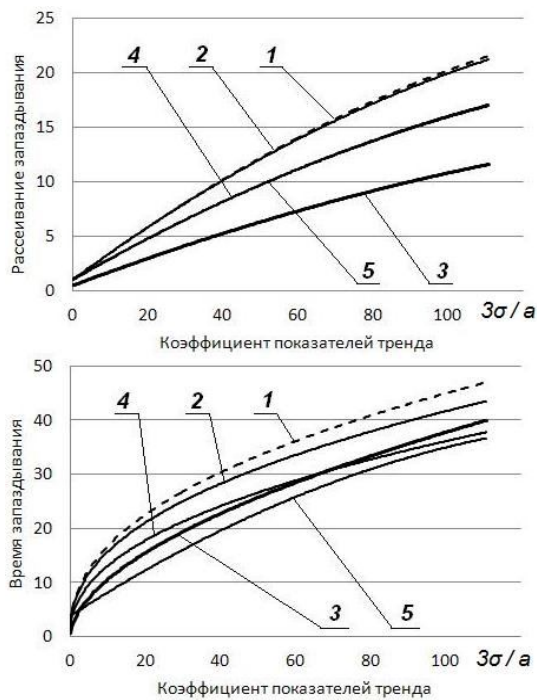


Рис. 9. Влияние сглаживания методом Керенского на эффективность интегрального S-критерия: 1 – экспоненциальное сглаживание; 2 – метод Керенского,  $V = 0,1$ ; 3 – несглаженная выборка; 4 – метод Керенского,  $V$ -расчетное; 5 – метод Керенского,  $V = 0,7$

### Заключение

Исследованы статистические свойства критериев тренда с целью выбора из них наиболее эффективных для последующего применения в алгоритмах параметрической диагностики.

Для оценки эффективности критериев разработана методика, основанная на имитационном моделировании. Наилучшие результаты продемонстрировали параметрический интегральный S-критерий, непараметрический t-критерий Стьюдента и Ф-критерий смешанного типа.

Изучено влияние разных способов сглаживания на эффективность критериев тренда. Исследовано влияние параметров сглаживания на снижение среднеквадратического отклонения выборки. Рассмотренные методы эффективно решают задачу снижения «зашумленности» выборки, но повысить эффективность критериев тренда они, к сожалению, не могут.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение робастности критериев, их устойчивости к сбойным значениям и ошибочному заданию априорной информации об объекте исследования. Это позволит рекомендовать тот или иной критерий для дальнейшего применения в составе алгоритма параметрической диагностики.

### Литература

1. Барзилович, Е.Ю. Эксплуатация ГТД по состоянию [Текст]: моногр. / Е.Ю. Барзилович, В.Ф. Воскобоев. – М.: Транспорт, 1981. – 197 с.
2. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов. – М.: Высш. шк., 2002. – 355 с.
3. Синтез систем управления и диагностики газотурбинных двигателей [Текст]: монография / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
4. Егоров, И.В. Информационные технологии в диагностике технического состояния ГТД [Текст]: моногр. / И.В. Егоров, В.А. Карасев, В.А. Скибин. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 368 с.
5. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики [Текст] / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Статистика, 1968. – 416 с.
6. Закс, Л. Статистическое оценивание [Текст]: моногр., пер. с нем. / Л. Закс. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
7. Максимов, В.П. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах [Текст]: монография / В.П. Максимов, И.В. Егоров, В.А. Карасев. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
8. Тьюки, Дж. Анализ результатов наблюдений [Текст]: моногр., пер. с англ. / Дж. Тьюки. – М.: Мир, 1981. – 693 с.
9. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление [Текст]: монография, пер. с англ. / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. Мир, 1974. – 406 с.
10. Lipowsky, H. Application of Bayesian Forecasting to change detection and prognosis of gas turbine performance [Text] / H. Lipowsky, S. Staudacher // Proceeding of ASME Turbo Expo. – 2009, GT2009-59447, Orlando, Florida, USA, June 8-12, 2009.
11. Мокроус, М.Ф. Применение методов диагностической обработки и анализа термодинамических параметров при стендовых испытаниях авиационных ГТД [Текст] / М.Ф. Мокроус // Испытания авиационных ГТД: сб. науч. тр. Уфимского авиационного института. – Уфа, 1977. – Вып. 5. – С. 29 – 34.
12. Чуев, Ю.В. Прогнозирование количественных характеристик процессов [Текст]: моногр. / Ю.В. Чуев, Ю.Б. Михайлов, В.И. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1975. – 400 с.
13. Епифанов, С.В. Сравнительное исследование эффективности критериев тренда параметров рабочего процесса ГТД [Текст] / С.В. Епифанов, Б.А. Щербань // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 9 (76). – С.185 – 189.
14. Совершенствование методики подготовки исходных данных для алгоритма параметрической диагностики [Текст] / С.В. Епифанов, Б.А. Щербань, Н.Д. Багаутдинов, Ю.В. Черкасов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 218 – 224.



15. Хальд, А. Математическая статистика с техническими приложениями [Текст]: моногр., пер. с англ. / А. Хальд. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1956. – 664 с.

16. Holt, C.C. Forecasting seasonals and by exponentially weighted moving averages [Text] / C.C. Holt // *Naval Research Memorandum*. – 1957. – № 52.

17. Керенский, А.М. О текущем предупредительном контроле процесса на базе экспоненциального сглаживания [Текст] / А.М. Керенский // *Вестник СГАУ им. С.П. Королева*. – 2009. – Вып. 3. – С. 227 – 230.

18. Миргород, В.Ф. Применение методов трендового анализа в задачах диагностики авиационных двигателей [Текст] / В.Ф. Миргород // *Основные результаты научно-технической деятельности: сб.*

науч. работ. – Одесса: ОАО «Элемент», 2008. – С. 218 – 226.

19. Миргород, В.Ф. Разработка предложений по трендовому контролю турбовального двигателя [Текст] / В.Ф. Миргород, Г.С. Радченко, В.М. Грудинкин // *Основные результаты научно-технической деятельности: сб. науч. работ.* – Одесса: ОАО «Элемент», 2008. – С. 227 – 241.

20. Миргород, В.Ф. Применение диагностических моделей и методов трендового анализа для оценки технического состояния газотурбинных двигателей [Текст] / В.Ф. Миргород, Г.С. Радченко // *Основные результаты научно-технической деятельности: сб. науч. работ.* – Одесса: ОАО «Элемент», 2008. – С. 182 – 184.

Поступила в редакцию 15.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.И. Кузнецов, НИИЭМ НАН Украины, Харьков, Украина.

### ВИБІР ЕФЕКТИВНИХ КРИТЕРІЇВ ТРЕНДУ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В АЛГОРИТМІ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

*С.В. Єніфанов, Б.О. Щербань, Ю.В. Черкасов*

Аналіз трендів діагностичних ознак двигунів дозволяє виявити несправності на ранній стадії. Для організації алгоритмічного тренд-аналізу необхідно виконати дослідження альтернативних критеріїв та обрати найбільш ефективні з них. У якості показника ефективності розглядається запізнювання виявлення тренду при однаковій для всіх критеріїв ймовірності помилкових рішень. За допомогою імітаційного моделювання виконано порівняльний аналіз найбільш поширених критеріїв тренду. Вивчено вплив різних методів згладжування на їхню ефективність. Обрано найбільш ефективні критерії для подальшого застосування в алгоритмах параметричної діагностики газотурбінних двигунів.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, параметрична діагностика, експлуатація за технічним станом, тренд-аналіз, критерії тренду, імітаційне моделювання, згладжування.

### EFFECTIVE TREND CRITERIA SELECTION FOR APPLICATION IN PARAMETRIC DIAGNOSTIC ALGORITHM

*S.V. Yepifanov, B.A. Scherban, Y.V. Cherkasov*

Trend analysis of systems and engine components diagnostic features can detect faults at an early stage. Alternative criteria are analyzed to select the most effective ones for use in algorithmic trend analysis. Trend detection retention is considered as the trend criterion efficiency factor. Comparative analysis of the commonly used criteria has been done using simulation. Effect of different smoothing methods is also analyzed, and the most effective criteria for future use in diagnostic algorithms for gas turbine engines parametric diagnostics are recommended.

**Key words:** gas turbine engine, the parametric diagnostics, maintenance, trend analysis, trend criteria, simulation modeling, smoothing.

**Єніфанов Сергей Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции авиационных двигателей и энергоустановок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

**Щербань Богдан Александрович** – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей и энергоустановок факультета авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: bogdanscherban@mail.ru.

**Черкасов Юрий Владимирович** – начальник отдела регулирования электрооборудования ГП «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро им. академика А.Г. Ивченко «Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: progress@ivchenko-progress.com.