

Слепцов Алексей Геннадьевич – Южный федеральный университет; e-mail: alslepcov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Берешполов Игорь Сергеевич – e-mail: bereshpolov@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Кравченко Юрий Алексеевич – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; доцент.

Sleptsov Aleksey Gennadievich – Southern Federal University; e-mail: alslepcov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; postgraduate.

Bereshpolov Igor Sergeevich – e-mail: bereshpolov@sfedu.ru; the department of computer aided design, postgraduate.

Kravchenko Yuriy Alekseevich – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; the department of computer aided design; dr. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.2.089

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-201-211

С.И. Клевцов

ПОРОГОВАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ СЕГМЕНТАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА

Для фиксации скачков среднего значения предложен способ детектирования, основанный на сегментации исследуемого сигнала на основе формирования кумулятивных сумм с использованием критерия Пейдж-Хинкли. Использование критерия правдоподобия Пейдж-Хинкли позволяет в реальном масштабе времени обнаружить скачкообразные изменения среднего значения контролируемого параметра объекта в условиях шума. При использовании метода предполагается, что сигнал описывается временным рядом значений исследуемого сигнала. Из этого ряда можно выделить отдельные последовательные участки, которые можно рассматривать как некоторые модели сигнала, ограниченные по времени. В основе метода лежит использование статистики критерия, на основе которой сравниваются две или три модели, оцененные по различным участкам сигнала, что позволяет обнаруживать скачкообразные изменения в параметрах модели. В методе предполагается, что рассматривается кусочно-постоянный сигнал с аддитивной помехой. В произвольные моменты времени происходят скачки среднего значения данного сигнала. Скачки среднего значения сигнала могут быть разными по знаку (фиксируются по разные стороны от оси времени) и значительно превышают исходное значение по модулю. Среднее значение сигнала – постоянная величина, близкая к нулю. Но возможна ситуация, когда повторный скачок будет сделан с уровня, отличного от близкого к нулю среднего значения, причем как в направлении возрастания, так и убывания среднего значения сигнала и изменения полярности сигнала (знака значений сигнала). Выбран критерий, который позволяет минимизировать время запаздывания в обнаружении скачка среднего значения снимаемого сигнала с минимумом ложных тревог. При этом используется сегментации исследуемого сигнала на основе формирования кумулятивных сумм с использованием критерия Пейдж-Хинкли. Использование критерия правдоподобия Пейдж-Хинкли позволяет в реальном масштабе времени обнаружить скачкообразные изменения среднего значения контролируемого параметра объекта в условиях шума.

Модель; критерий правдоподобия; скачок сигнала; детектирование; ускорение; объект.

S.I. Klevtsov

**THRESHOLD ASSESSMENT OF THE STATE OF A TECHNICAL OBJECT
BASED ON SEGMENTATION AND IDENTIFICATION
OF THE CONTROLLED PARAMETER MODEL**

To fix the jumps in the average value, a detection method based on the segmentation of the signal under study based on the formation of cumulative sums using the Page-Hinckley criterion is proposed. The use of the Page-Hinckley likelihood criterion makes it possible to detect abrupt changes in the average value of the controlled object parameter in real time under noisy conditions. When using the method, it is assumed that the signal is described by a time series of values of the signal under study. From this series, it is possible to single out separate successive sections, which can be considered as some signal models limited in time. The method is based on the use of criterion statistics, on the basis of which two or three models estimated from different parts of the signal are compared, which makes it possible to detect abrupt changes in the model parameters. The method assumes that a piecewise constant signal with additive noise is considered. At arbitrary moments of time, there are jumps in the average value of this signal. Jumps in the average value of the signal can be different in sign (fixed on different sides of the time axis) and significantly exceed the original value in absolute value. The average value of the signal is a constant value close to zero. But a situation is possible when a repeated jump will be made from a level different from the average value close to zero, both in the direction of increasing and decreasing the average value of the signal and changing the signal polarity (the sign of the signal values). A criterion has been chosen that allows minimizing the delay time in detecting a jump in the average value of the recorded signal with a minimum of false alarms. In this case, segmentation of the signal under study is used based on the formation of cumulative sums using the Page-Hinckley criterion. The use of the Page-Hinckley likelihood criterion makes it possible to detect abrupt changes in the average value of the controlled object parameter in real time under noisy conditions.

Model; likelihood criterion; signal jump; detection; acceleration; object.

Введение. Одной из важных задач систем контроля и управления является обеспечение безопасного функционирования технического объекта. В процессе контроля отслеживается изменение контролируемых параметров объекта [1–6]. Состояние технического объекта определяется совокупностью параметров, каждый из которых может меняться в заданном диапазоне значений без последствий для работоспособности объекта [7–9]. Из всей номенклатуры параметров можно выделить особо важные, выход которых за диапазон допустимых значений может привести к существенным потерям работоспособности или даже аварийной ситуации [9–13]. Система контроля и управления объектом в этом случае должна предпринять необходимые действия для устранения нештатной ситуации вплоть до остановки работы. Но эффективность этих действий зависит от того, как быстро были обнаружены недопустимые изменения и как быстро отреагировала система на них.

Снимаемые для анализа и реакции данные с технического объекта обрабатываются в системе контроля и управления с помощью микропроцессорных модулей [14]. Оценка изменения состояния объекта в микропроцессорном модуле на основе определения динамики изменения определяющего параметра может быть затруднено, если поступающий от датчика сигнал имеет шумовую составляющую.

В таком случае оценка состояния объекта может производиться путем сравнения среднего значения сигнала с границами областей значений параметра, характеризующих состояния объекта (границы нормы, опасной зоны, аварийной зоны) [15].

Особо опасны для функционирования объекта резкие, скачкообразные изменения параметра, которые сложно зафиксировать в период времени, в течение которого возможно эффективное противодействие развитию нештатной ситуации [16, 17]. Во многих случаях скачкообразное изменение среднего значения пара-

метра характеризует недопустимое изменение состояния объекта, когда можно говорить о переходе объекта из устойчивого в неустойчивое состояние, например, для автомобиля – в неустойчивое положение на дороге [18]. В этом случае важно зафиксировать величину скачка, чтобы в процессе сравнения с установленным пороговым значением λ определить факт перехода в другое состояние и момент этого перехода (время перехода в единицах времени от некоего фиксированного начального значения). Фактически речь идет об изменении моделей сигнала во времени. Основная задача сводится к задаче столь быстрого обнаружению скачка, чтобы иметь возможность в реальном времени фиксировать последующие существенные скачки и, следовательно, отслеживать существенные изменения в состоянии объекта.

Анализ задачи. Основные требования к процедуре детектирования заключаются в следующем [16]:

- ♦ Процедура должна быть малочувствительна к шуму. Иными словами, необходимо, чтобы среднее время между ложными срабатываниями T_L детектирующей процедуры было большим.

- ♦ Необходимо, чтобы запаздывание при обнаружении скачка среднего значения сигнала было небольшим, то есть среднее время запаздывания при обнаружении скачка T_Z было таким, чтобы процедура детектирования позволяла обнаружить абсолютное большинство существенных изменений состояния объекта в контролируемой ситуации.

Очевидно, что указанные требования в значительной степени противоречат друг другу, поэтому приходится принимать компромиссное решение $R = \alpha \cdot T_Z + \beta / T_L = \text{const}$ в рамках конкретной задачи.

Дополнительным требованием является невысокая вычислительная сложность алгоритма регистрации скачкообразного изменения среднего значения, определения величины скачка и момента времени его осуществления. Указанное требование связано с необходимостью выполнения алгоритма в микропроцессорном модуле системы контроля и управления в режиме реального времени в условиях ограничений, характерных для микроконтроллера, на быстроедействие и объем хранимых промежуточных данных.

Для фиксации скачков среднего значения при отсутствии шума существует очень простой метод, связанный с регистрацией больших значений производной сигнала [16]. В более реалистичной версии подхода при наличии шума на первом этапе выполняется предварительная фильтрация сигнала, а затем оценка изменения производной. Однако, следует отметить, что в этом случае фильтрация сигнала приводит не только к снижению шума, но и к сглаживанию сигнала. Это, в свою очередь, может привести к неопределенности при установлении порогового значения λ в схеме сравнения этой константы с текущим значением производной и необходимости выработки процедуры уточнения базового значения λ . Более простым вариантом является установка «загрубленного» значения λ (например, значительно более низкого по отношению к базовому), но этом случае возможно увеличение ложных срабатываний.

В целом, как показывают сравнительные исследования, более эффективным способом детектирования является сегментации исследуемого сигнала на основе формирования кумулятивных сумм с использованием критерия Пейджа-Хинкли [16, 19, 20]. Использование критерия правдоподобия Пейджа-Хинкли позволяет в реальном масштабе времени обнаружить скачкообразные изменения среднего значения контролируемого параметра объекта в условиях шума.

При использовании метода предполагается, что сигнал описывается последовательными единицами, характеризуемыми некоторыми моделями. В основе метода лежит использование статистики критерия, на основе которой сравниваются две или три модели, оцененные по различным участкам сигнала, что позволяет обнаруживать скачкообразные изменения в параметрах модели.

Однако алгоритм реализации критерия Пейджа-Хинкли требует адаптации к особенностям задачи и ограничениям, связанным с его выполнением в микроконтроллере.

Постановка задачи. Предположим, что наблюдается кусочно-постоянный сигнал с аддитивной помехой. В произвольные моменты времени происходят скачки среднего значения данного сигнала.

Особенности поведения сигнала:

- ♦ Нормальный сигнал представляет собой кусочно-постоянный сигнал с аддитивной помехой. Среднее значение сигнала μ_0 – постоянная величина, близкая к нулю.

- ♦ Скачки среднего значения сигнала могут быть разными по знаку (фиксируются по разные стороны от оси времени) и значительно превышают исходное значение по модулю.

- ♦ Возможна ситуация, когда повторный скачок будет сделан с уровня, отличного от μ_0 , причем как в направлении возрастания, так и убывания среднего значения сигнала и изменения полярности сигнала (знака значений сигнала).

Необходимо выбрать критерий, который позволил бы минимизировать время запаздывания в обнаружении скачка среднего значения снимаемого сигнала с минимумом ложных тревог.

Пусть на входе некоторого датчика наблюдается последовательность дискретных сигналов $y = \{y(i)\}_{i=1}^n$, которые возмущаются белым шумом $\varepsilon = \{\varepsilon(i)\}_{i=1}^n$. Т.е. сигнал представляет собой последовательность независимых гауссовских случайных величин с дисперсией σ^2 и средним μ .

$$y = \mu + \varepsilon.$$

При этом в заведомо неизвестный момент времени τ происходит скачкообразное изменение среднего значения сигнала:

$$\mu = \begin{cases} \mu_0, & \text{если } n \leq \tau - 1, \\ \mu_1, & \text{если } n \geq \tau \end{cases},$$

где n – число, определяющее последовательность измерений сигнала из n временных отсчетов; τ – момент скачкообразного изменения.

То есть до момента времени $i=\tau-1$ значения временного ряда $y^{(0)} = \{y(i)\}_{i=1}^{\tau-1}$ принадлежат нормальному распределению с характеристиками σ^2 и μ_0 , а после момента времени $i=\tau$ значения временного ряда $y^{(1)} = \{y(i)\}_{i=\tau}^n$ принадлежат нормальному распределению с характеристиками σ^2 и μ_1 .

Временной ряд значений параметра y разбит на два временных ряда $y^{(0)}$ и $y^{(1)}$ так, что $y = \bigcup y^{(k)}, k = 0, 1$.

Задача состоит в обнаружении таких скачкообразных изменений в реальном масштабе времени.

Модель обнаружения скачкообразного изменения параметра. Основная проблема системы контроля и управления объекта сводится к скорейшему обнаружению скачкообразного изменения, чтобы иметь возможность обработать данные по другим каналам.

Необходимо решить противоречие между требованием относительно малого числа ошибочных тревог и малого запаздывания в обнаружении скачкообразного изменения, поскольку уменьшение времени обнаружения приводит к увеличению вероятности появления ошибочных тревог.

Детектор называют оптимальным, если при фиксированном среднем времени между ошибочными тревогами запаздывание в обнаружении скачкообразного изменения сигнала является минимальным.

Скачкообразное изменение сигнала свидетельствует об изменении состояния контролируемого объекта. При этом, как правило, известен порог опасного изменения параметра $Y_D = \{Y_{Dmin}, Y_{Dmax}\}$ (минимальное и максимальное значения) или величина опасного скачка параметра ΔY_D от уровня некоторого стабильного во времени.

В этом случае среднее значение сигнала после скачка можно определить, как $\mu_1 \approx \mu_0 \pm \Delta Y_D$.

Возможно

$$\mu_1 \approx \begin{cases} Y_{Dmax}, & \text{если считать, что } \mu_0 \ll |Y_D|. \\ Y_{Dmin} \end{cases}$$

Таким образом, будем считать, что множество измеренных значений параметра представляют собой случайные величины, распределенные по нормальному закону с плотностью вероятности

$$P_k(i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y^{(k)}(i) - \mu_k)^2}{2\sigma^2}}.$$

В выражении индекс k определяет временные интервалы сбора данных до скачка $[t_0, t_{\tau-1}]$ ($k = 0$) и после скачка $[t_{\tau}, t_n]$ ($k = 1$) соответственно. В рамках схемы использования критерия правдоподобия Пейджа–Хинкли индексу $k = 0$ эквивалентно принятие гипотезы H_0 на интервале $[t_0, t_{\tau-1}]$, что соответствует отсутствию скачка, а $k = 1$ – гипотезы H_1 на интервале $[t_{\tau}, t_n]$, что соответствует регистрации скачка среднего значения.

Обнаружение скачкообразного изменения является эквивалентом принятию гипотезы H_1 (есть скачкообразное изменение), когда она проверяется по отношению к гипотезе H_0 (нет скачкообразного изменения).

Критерий отношения правдоподобия для этих двух гипотез принимает вид [16, 19]:

$$\frac{\prod_{i=1}^{\tau-1} P_0(y_i) \cdot \prod_{i=\tau}^n P_1(y_i)}{\prod_{i=1}^n P_0(y_i)} = \prod_{i=\tau}^n \frac{P_1(y_i)}{P_0(y_i)}.$$

Здесь и далее для удобства полагаем $y_i = y(i)$

Логарифмирование дает статистику критерия:

$$\Lambda_n(\tau) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{i=\tau}^n (y_i - \frac{\mu_1 + \mu_0}{2}).$$

или

$$A_n(\tau) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{i=\tau}^n (y_i - \mu_0 - \frac{\mu_1 - \mu_0}{2}).$$

Окончательно

$$A_n(\tau) = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \delta \cdot \sum_{i=\tau}^n (y_i - \mu_0 - \frac{\delta}{2}),$$

$\delta = \mu_1 - \mu_0$ – величина скачкообразного изменения с учетом знака.

Введем обозначение

$$S_\tau^n(\mu_0, \delta) = \delta \cdot \sum_{i=\tau}^n (y_i - \mu_0 - \frac{\delta}{2}). \quad (1)$$

Критерий отношения правдоподобия для гипотез H_0 и H_1 тогда принимает вид

$$G_n = \max_{\tau} S_\tau^n(\mu_0, \delta) \begin{matrix} > \lambda \Rightarrow H_1, \\ < \lambda \Rightarrow H_0 \end{matrix} \quad (2)$$

где G_n – кумулятивная сумма; λ – пороговое значение критерия для принятия гипотезы H_0 или H_1 .

Оптимальность этого критерия состоит в том, что он минимизирует время запаздывания в обнаружении скачка среднего значения параметра при заданном среднем времени между ошибочными тревогами [21, 22].

Для обнаружения возникновения скачка среднего значения параметра, необходимо:

♦ априорно задать минимальное значение скачка δ_{min} , который необходимо обнаружить;

♦ на каждом шаге съема значения параметра одновременно выполнять процедуру обнаружения скачка как в сторону увеличения (3, 4), так и в сторону уменьшения (5, 6) среднего значения параметра.

Обнаружение увеличения среднего значения параметра и принятие гипотезы H_1^+ осуществляется с использованием следующих соотношений:

$$\begin{cases} \Theta_0 = 0, \\ \Theta_n = \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_0 - \frac{\delta_{min}}{2}) \quad (n \geq 1), \\ m_n = \min_{0 \leq v \leq n} \Theta_v, \end{cases} \quad (3)$$

Обнаружение фиксируется, если

$$\Theta_n - m_n \geq \frac{\lambda}{\delta_{min}}. \quad (4)$$

Обнаружение уменьшения среднего значения параметра и принятие гипотезы H_1^- осуществляется с использованием следующих соотношений:

$$\begin{cases} \Omega_0 = 0, \\ \Omega_n = \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_0 + \frac{\delta_{min}}{2}) \quad (n \geq 1), \\ M_n = \max_{0 \leq v \leq n} \Omega_v, \end{cases} \quad (5)$$

Обнаружение фиксируется, если

$$M_n - \Omega_n \geq \frac{\lambda}{\delta_{min}}. \quad (6)$$

Если же совместно выполняются условия:

$$\Theta_n - m_n \leq \frac{\lambda}{\delta_{min}}$$

и

$$M_n - \Omega_n \leq \frac{\lambda}{\delta_{min}},$$

то фиксируется отсутствие увеличения и уменьшения среднего значения параметра выше критического, что соответствует принятию гипотезы H_0 .

Результаты моделирования. В качестве исходных данных для моделирования использовались данные результатов измерений ускорения при движении автомобиля по дороге с неровностями, изгибами и препятствиями (рис. 1). Измерения проводились с использованием трехосевого акселерометра, запись сигнала осуществлялась по каждой оси отдельно, шаг измерений составлял 0,015625 сек.

Как видно из рисунка, исходные данные характеризуются нестабильностью, имеются отдельные выбросы.

Для оценки параметра λ из соотношений (1) и (2) получим:

$$\frac{\sum_{i=\tau}^n y_i}{n - \tau + 1} - \mu_0 > \frac{\lambda}{\delta} + \frac{\delta}{2}.$$

Если обозначить

$$\mu_\tau = \frac{\sum_{i=\tau}^n y_i}{n - \tau + 1},$$

$$\text{то } \mu_\tau - \mu_0 > \frac{\delta}{2} + \frac{\lambda}{\delta}.$$

При фиксации скачка разность между средним значением сигнала в диапазоне $[\tau, n]$ отсчетов времени и средним значением до скачка μ_0 должна быть больше суммы половины значения контролируемой величины скачка δ и значения λ/δ . Величина λ может изменяться в диапазоне $(0 \div \delta^2/2)$. Если необходимо зафиксировать скачок как можно раньше, то $\lambda \sim 0 \div 0,1\delta^2$. Но в этом случае пороговое значение критерия достаточно низкое и есть вероятность ложной фиксации скачка. Приближение к верхней границе диапазона может привести к более позднему обнаружению скачка.

Например, при обработке сигнала, представленного на рис. 1, с использованием представленной методики, начало скачка сигнала зафиксировано при $\tau = 160$. Здесь τ измеряется в относительных единицах, каждая единица равна $\Delta\tau = 0,015625$ сек. С учетом интервала $[\tau, n]$ реальное время обнаружения скачка сигнала $\tau_{\text{jump}} = 230$ в относительных единицах. Величина скачкообразного изменения $\delta = -0,1g$.

Существующий интегральный способ обнаружения отклонений технологического процесса от заданного поля допусков может быть использован для фиксации скачка сигнала. В его основе лежит метод обнаружения нестационарности в случайном контролируемом процессе [8]. Сущность интегрального метода заключается в том, что в качестве критерия обнаружения отклонений технологического процесса от заданного поля допусков в контролируемом процессе $X(t)$ принимается площадь $S(t)$, ограниченная $X(t)$ и сглаженной реализацией $\bar{X}(t)$. Если величина площади отклонения $S(t)$ больше некоторого заданного критического значения ξ , то принимается решение о наличии отклонения от заданного поля допусков [8]. Момент превышения значения ξ можно считать моментом начала скачка сигнала.

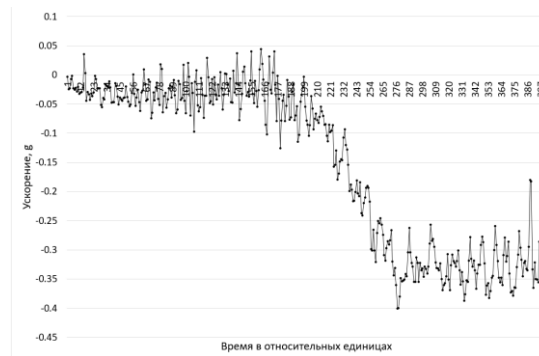


Рис. 1. График изменения ускорения от времени в относительных единицах

При определении скачка интегральным методом с предварительным сглаживанием сигнала, момент времени, когда зафиксирован скачок $\tau_{\text{jump}_r} = 272$. Разность $\tau_{\text{jump}_r} - \tau_{\text{jump}} = 42$, что составляет 0,65625 сек.

При проведении моделирования использовались данные об изменении ускорения по оси X акселерометра с характерными скачками ускорения, пронумерованными на рис. 2.

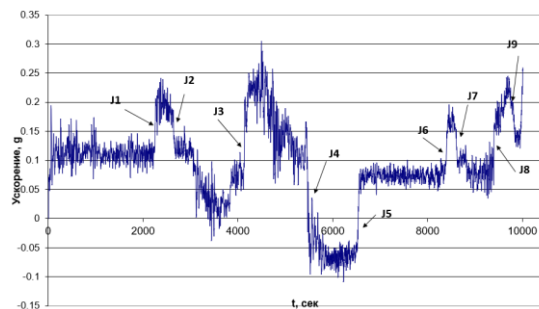


Рис. 2. График изменения ускорения по оси X акселерометра

На рис. 3 представлены результаты фиксации скачка сигнала с использованием предложенной методики и интегральным способом.

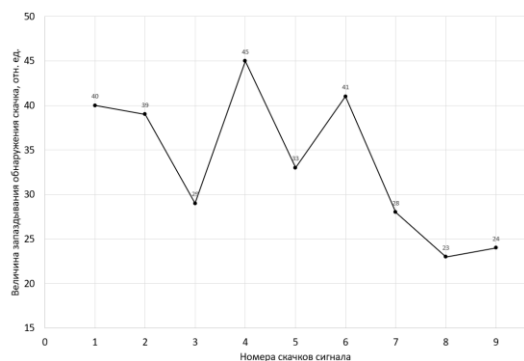


Рис. 3. Результаты сравнения времени определения скачка сигнала

Величина запаздывания момента обнаружения сигнала интегральным способом по сравнению с предлагаемым составляет в относительных единицах величину $\sim 23 \div 45$ или $\sim 0,359375 \div 0,703125$ сек. Для других исходных данных величина запаздывания будет, конечно, иной, но положительно определенной.

Заключение. Применяемый интегральный метод обнаружения нестационарности в случайном контролируемом процессе основан на накоплении результатов измерений за заданный промежуток времени. Это может привести к некоторой задержке обнаружения скачка сигнала и выходу его за технологические поля допусков.

Использование статистических критериев, таких, как отношения правдоподобия позволяет осуществить обнаружение скачкообразного изменения среднего значения параметра с минимальным запаздыванием. При этом повышается эффективность системы контроля технического объекта, достигается необходимая своевременность реакции на недопустимое отклонение контролируемого сигнала.

Это позволяет создать эффективную систему контроля состояния объекта в реальном времени и предотвратить развитие нештатного процесса за счет своевременного формирования сигнала об опасности и последующих действий по стабилизации состояния контролируемого объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бушмелева К.И., Плюснин И.И., Бушмелев П.Е., Увайсов С.У. Распределенная беспроводная система мониторинга технического состояния объектов газотранспортной сети // Измерительная техника. – 2013. – № 3. – С. 7-10.
2. Винограденко А.М., Кузнецов А.В. Система мониторинга технического состояния подвижных объектов // Техника средств связи. – 2018. – № 2 (142). – С. 103-108.
3. Винограденко А.М. Моделирование систем мониторинга технического состояния сложных технических объектов на основе методов теории энтропийных потенциалов // Техника средств связи. – 2019. – № 2 (146). – С. 71-78.
4. Бухтыров В.В. Исследование методов прогнозирования параметров технического состояния объектов при мониторинге и диагностике // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 12 (114). – С. 20-22.
5. Щербатов И.А., Долгушев А.Н., Белов М.К., Агибалов В.А., Салов И.В. Оценка технического состояния оборудования тепловой станции на примере конденсатора // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Vol. 11, No. 3. – P. 45-49.
6. Protalinsky O.M., Shcherbatov I.A., Stepanov P.V. Identification of the actual state and entity availability forecasting in power engineering using neural-network technologies // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 891, No. 1. – P. 012289.
7. Кан О.А. Организация адаптивного опроса датчиков в автоматизированной системе газового контроля // Автоматика и информатика. – 2002. – № 1-2. – С. 32-33.
8. Sadhukha. Change detection algorithms. – From <http://www.research.rutgers.edu/~sadhukha/file2.pdf>.
9. Кан О.А., Жаркимбекова А.Т., Кадирова Ж.Б., Жаксыбаева С.Р., Жолмагамбетова Б.Р. Обнаружение отклонений параметров технологического процесса в контролируемом объекте // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 5-2. – С. 186-189.
10. Ross G.J., Adams N.M., Tasoulis D.K., & Hand D.J. Exponentially Weighted Moving Average Charts for Detecting Concept Drift // Pattern Recognition Letters. – 2012. – 33 (2). – P. 191-198. – DOI: 10.1016/j.patrec.2011.08.019.
11. Raza H., Prasad G., and Li Y. Ewma model based shift-detection methods for detecting covariate shifts in non-stationary environments // Pattern Recognition. – 2015. – 48 (3). – P. 659-669. – <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.07.028>.
12. Barddal J.P., Gomes H.M., Enembreck F., Pfahringer B., & Bifet A. On dynamic feature weighting for feature drifting data streams / In P. Frasconi, N. Landwehr, G. Manco, & J. Vreeken (Eds.) // Proceedings of European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. – 2016. – Vol. LNAI 9852. – P. 129-144. Cham, Switzerland: Springer. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1_9.

13. Koroleva M.N., Burdo G.B. On ontological modeling of measurements in a complex monitoring system of technical object // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2019. – № 3. – С. 243-246.
14. Клевцов С.И. Прогнозирование измерения состояния параметров технического объекта с помощью интеллектуального микропроцессорного модуля // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010: Сб. научных трудов. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 619-622.
15. Клевцов С.И. Разработка модели и алгоритма отслеживания изменения состояния технического объекта на основе модифицированной нейронной сети Хэмминга // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 11. – С. 42-52.
16. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем: пер. с англ. М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвенист и др. / под ред. М. Бассвиль и А. Банвениста. – М.: Мир, 1989. – 278 с.
17. Ширяев А.Н. Задача скорейшего обнаружения нарушения стационарного режима // Доклады АН СССР. – 1961. – Т. 138, № 5. – С. 1039-1042.
18. Клевцов С.И. Определение момента скачкообразного изменения быстропеременной физической величины в реальном времени с использованием диаграмм Пуанкаре // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 108-113.
19. Hinkley D.V. Inference about the Change-Point from Cumulative Sum-Tests // Biometrika. – 1971. – 508, 3. – P. 509-523.
20. Mouss H., Mouss D., Mouss N., & Sefouhi L. Test of Page-Hinkley, an approach for fault detection in an agro-alimentary production system // In Proceedings of the Asian control conference. – 2004. – Vol. 2. – P. 815-818. – DOI: 10.1109/ASCC.2004.184970.
21. Basseville M. and Nikiforov I.V. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. – PTR Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. 1993. – 469 p.
22. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. – М.: Изд-во «Советское радио», 1968. – 256 с.

REFERENCES

1. Bushmeleva K.I., Plyusnin I.I., Bushmelev P.E., Uvaysov S.U. Raspredelennaya besprovodnaya sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya ob"ektov gazotransportnoy seti [Distributed wireless system for monitoring the technical condition of gas transmission network facilities], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2013, No. 3, pp. 7-10.
2. Vinogradenko A.M., Kuznetsov A.V. Sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnykh ob"ektov [Monitoring system of the technical condition of mobile objects], *Tekhnika sredstv svyazi* [Communication equipment], 2018, No. 2 (142), pp. 103-108.
3. Vinogradenko A.M. Modelirovanie sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov na osnove metodov teorii entropiynykh potentsialov [Modeling of systems for monitoring the technical condition of complex technical objects based on the methods of the theory of entropy potentials], *Tekhnika sredstv svyazi* [Communication equipment], 2019, No. 2 (146), pp. 71-78.
4. Bukhtoyarov V.V. Issledovanie metodov prognozirovaniya parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya ob"ektov pri monitoringe i diagnostike [Research of methods of forecasting parameters of the technical condition of objects during monitoring and diagnostics], *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: ways of development], 2020, No. 12 (114), pp. 20-22.
5. Shcherbatov I.A., Dolgushev A.N., Belov M.K., Agibalov V.A., Salov I.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya teplovoy stantsii na primere kondensatora [Assessment of the technical condition of the equipment of a thermal station on the example of a condenser], *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, Vol. 11, No. 3, pp. 45-49.
6. Protalinsky O.M., Shcherbatov I.A., Stepanov P.V. Identification of the actual state and entity availability forecasting in power engineering using neural-network technologies, *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2017, Vol. 891, No. 1, pp. 012289.
7. Kan O.A. Organizatsiya adaptivnogo oprosa datchikov v avtomatizirovannoy sisteme gazovogo kontrolya [Organization of adaptive survey of sensors in an automated gas control system], *Avtomatika i informatika* [Automation and computer science], 2002, No. 1-2, pp. 32-33.
8. Sadhukha. Change detection algorithms. From <http://www.research.rutgers.edu/~sadhukha/file2.pdf>.

9. Kan O.A., Zharkimbekova A.T., Kadirova Zh.B., Zhaksybaeva S.R., Zholmagambetova B.R. Obnaruzhenie otkloneniy parametrov tekhnologicheskogo protsessa v kontroliruemom ob"ekte [Detection of deviations of technological process parameters in a controlled object], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2015, No. 5-2, pp. 186-189.
10. Ross G.J., Adams N.M., Tasoulis D.K., & Hand D.J. Exponentially Weighted Moving Average Charts for Detecting Concept Drift, *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33 (2), pp. 191-198. DOI: 10.1016/j.patrec.2011.08.019.
11. Raza H., Prasad G., and Li Y. Ewma model based shift-detection methods for detecting covariate shifts in non-stationary environments, *Pattern Recognition*, 2015, 48 (3), pp. 659-669. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.07.028>.
12. Barddal J.P., Gomes H.M., Enembreck F., Pfahringer B., & Bifet A. On dynamic feature weighting for feature drifting data streams, In P. Frasconi, N. Landwehr, G. Manco, & J. Vreeken (Eds.), *Proceedings of European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, 2016, Vol. LNAI 9852, pp. 129-144. Cham, Switzerland: Springer. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1_9.
13. Koroleva M.N., Burdo G.B. On ontological modeling of measurements in a complex monitoring system of technical object, *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh system* [Open semantic technologies for designing intelligent systems], 2019, No. 3, pp. 243-246.
14. Klevtsov S.I. Prognozirovanie izmereniya sostoyaniya parametrov tekhnicheskogo ob"ekta s pomoshch'yu intellektual'nogo mikroprotsessornogo modulya [Predicting the measurement of the state of parameters of a technical object using an intelligent microprocessor module], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh system – 2010: Sb. nauchnykh trudov* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems – 2010: Collection of scientific papers]. Moscow: IPPM RAN, 2010, pp. 619-622.
15. Klevtsov S.I. Razrabotka modeli i algoritma otslezhivaniya izmeneniya sostoyaniya tekhnicheskogo ob"ekta na osnove modifitsirovannoy neyronnoy seti Khemminga [Development of a model and algorithm for tracking changes in the state of a technical object based on a modified Hamming neural network], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 11, pp. 42-52.
16. Obnaruzhenie izmeneniya svoystv signalov i dinamicheskikh system [Detection of changes in the properties of signals and dynamic systems]: transl. from engl. by M. Bassvil', A. Vilski, A. Banvenist i dr., ed. by M. Bassvil' i A. Banvenista. Moscow: Mir, 1989, 278 p.
17. Shiryayev A.N. Zadacha skoreyshego obnaruzheniya narusheniya statsionarnogo rezhima [The task of early detection of a violation of the stationary regime], *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1961, Vol. 138, No. 5, pp. 1039-1042.
18. Klevtsov S.I. Opredelenie momenta skachkoobraznogo izmeneniya bystroperemennoy fizicheskoy velichiny v real'nom vremeni s ispol'zovaniem diagramm Puankare [Determination of the moment of an abrupt change in a rapidly variable physical quantity in real time using Poincare diagrams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 5, pp. 108-113.
19. Hinkley D.V. Inference about the Change-Point from Cumulative Sum-Tests, *Biometrika*, 1971, 508, 3, pp. 509-523.
20. Mouss H., Mouss D., Mouss N., & Sefouhi L. Test of Page-Hinkley, an approach for fault detection in an agro-alimentary production system, In *Proceedings of the Asian control conference*, 2004, Vol. 2, pp. 815-818. DOI: 10.1109/ASCC.2004.184970.
21. Basseville M. and Nikiforov I.V. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. PTR Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. 1993, 469 p.
22. Romanenko A.F., Sergeev G.A. Voprosy prikladnogo analiza sluchaynykh protsessov [Questions of applied analysis of random processes]. Moscow: Izd-vo «Sovetskoe radio», 1968, 256 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: siklevcov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634680890, доб. 30107; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: siklevcov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634680890, ext. 30107; cand. of eng. sc.; associate professor.