

С.И. Клевцов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НОРМИРОВАННОГО РАЗМАХА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИДЕНТИЧНОСТИ ЦИКЛОВ ИСПЫТАНИЙ

Точность измерений микропроцессорного датчика физических величин в значительной степени определяется его характеристикой преобразования, которая строится на основе данных, полученных при проведении градуировочных испытаний. Качество характеристики преобразования датчика, от которого зависит точность измерений, в значительной степени определяется точностью аппроксимации характеристики преобразования датчика. Градуировочные испытания датчика проводятся по методике испытаний. В процессе проведения испытаний предпринимаются особые меры для исключения влияния отдельных циклов испытаний друг на друга. Поэтому небольшие отклонения от схемы проведения могут привести к снижению качества характеристики преобразования и снижению метрологических характеристик датчика. Важно, чтобы результаты нескольких циклов испытаний при неизменных параметрах среды были независимыми друг от друга. В статье представлен способ определения качества результатов градуировочных испытаний микропроцессорного датчика давления. Метод позволяет оценить влияние предыдущих циклов испытаний на последующие при нарушении условий их проведения. Анализу подвергается искусственный временной ряд, сформированный с использованием данных испытаний. Для построения была реализована специализированная процедура соединения отдельных циклов в единую структуру, аналогичную временному ряду. Для каждого фиксированного значения температуры был построен отдельный временной ряд. Поскольку полученный временной ряд представляет собой линейную функцию, его показатель Херста должен быть близким к единице. В этом случае ряд является трендоустойчивым, а отдельные циклы испытаний независимы и формируют единый линейный тренд с незначительными отклонениями от него. Если в процессе испытаний были нарушены существенные условия их проведения, например, условия перехода от одного температурного режима к другому, то на результаты текущего цикла испытаний будут влиять температурные условия предыдущего цикла. Для определения таких нарушений предложена процедура сравнения показателя Херста временного ряда, в котором присутствуют данные недостоверного цикла испытаний, с диапазоном допустимых значений. Если показатель Херста соответствует установленным ограничениям, то результаты испытаний можно использовать для построения качественной градуировочной характеристики. В противном случае на результаты анализируемого цикла повлияли условия предыдущего цикла испытаний и рекомендуется провести повторные циклы испытаний.

Характеристика преобразования; показатель Херста; датчик; давление; испытание; временной ряд.

S.I. Klevtsov

USING THE NORMALIZED RANGE METHOD TO ASSESS THE IDENTITY OF TEST CYCLES

The measurement accuracy of a microprocessor-based physical measurement sensor is measured to the extent determined by its conversion characteristic, which is constructed from data obtained from various calibration tests. Characteristics of the sensor converter, on which the measurement accuracy depends, within a certain degree of approximation of the characteristics of the sensor converter. Sensor calibration tests are carried out in accordance with the test procedure. In the process of fulfilling obligations, errors arise due to exceptions of individual loops made on each other. Therefore, small deviations from the conduction scheme can lead to a decrease in the quality of the conversion characteristics and a decrease in the metrological characteristics of the sensor. It is important that the results of several test cycles under constant environmental conditions are independent of each other. The article presents a method for determining

the quality of the results of calibration tests of a microprocessor pressure sensor. The method allows you to evaluate previous test cycles for violation of the conditions of their conduct. An artificial time series constructed using test data is analyzed. For construction, a specialized procedure was implemented for connecting individual cycles into a single structure, similar to a time series. A separate time series was constructed for each constant temperature value. Since the resulting time series is a linear function, its Hurst exponent should be close to one. In this case, the series is trend-resistant, and experimental cycles check independence and calculate a single linear trend with minor deviations from it. If during the test any conditions for their conduct were violated, for example, the conditions for transition from one temperature regime to a procedure, then based on the results of the current test regime, the temperature conditions of the cycle regime will be observed. To determine such scales, a procedure is proposed for comparing the Hurst exponent of a time series, which presents data from an unreliable test cycle, with a range of acceptable results. If the Hurst exponent meets the established limits, the test results can be used to construct a high-quality calibration characteristic. Otherwise, the results of the analyzed cycle describe the test cycle conditions and recommend repeated test cycles.

Conversion characteristic; Hurst exponent; pressure sensor; test; time series.

Введение. Система контроля работоспособности технического объекта базируется на обработке данных о его параметрах, поступающих с датчиков физических величин, таких как датчики давления. Оценивается стабильность значений и динамика их изменений. На объект воздействуют различные дестабилизирующие факторы, такие как температура, влажность, электромагнитные поля и другие. Это приводит к изменению характера работоспособности объекта вплоть до возможности возникновения нештатных и аварийных ситуаций. В этих условиях важное значение приобретает точная оценка этих изменений с помощью датчиков. В настоящее время наиболее востребованными в системах контроля и мониторинга являются микропроцессорные датчики, в которых для обработки физических сигналов, в том числе давления, используется микроконтроллер [1, 2].

Точность измерений микропроцессорного датчика физических величин в значительной степени определяется его характеристикой преобразования, которая строится на основе данных, полученных при проведении градуировочных испытаний [3, 4].

Качество характеристики преобразования датчика, от которого зависит точность измерений, в значительной степени определяется точностью аппроксимации характеристики преобразования датчика. Для представления реальной характеристики преобразования микропроцессорного датчика давления формируется ее математическая модель. Модель должна в максимальной степени повторять поведение реальной характеристики преобразования с учетом влияния на датчик различных факторов, в условиях воздействия которых находится контролируемый технический объект [3, 5, 6].

Градуировочные испытания датчика проводятся по методике испытаний. В процессе проведения испытаний предпринимаются особые меры для исключения влияния отдельных циклов испытаний друг на друга. Поэтому небольшие отклонения от схемы проведения могут привести к снижению качества характеристики преобразования. Это, в свою очередь, приводит к снижению метрологических характеристик датчика. В частности, фиксируется повышение погрешность измерений. Кроме того, сама схема проведения испытаний может содержать погрешности, которые в дальнейшем могут привести к недопустимым искажениям характеристики преобразования. Все указанные факторы, к сожалению, сложно обнаружить. Но их влияние на точность построения характеристики преобразования существенно. Важно, чтобы результаты нескольких циклов испытаний при неизменных параметрах среды были независимыми друг от друга.

Также может показаться, что неточности, зафиксированные при испытаниях, могут быть связаны с несовершенством первичного преобразователя, электрической схемы, программного обеспечения, ограничениями элементной базы и т.д. [3, 6]. При градуировочных испытаниях датчик подвергается воздействию не только основного измеряемого фактора, но и фактора внешней среды, который в наибольшей степени влияет на его метрологические характеристики. Для датчика давления это температура окружающей среды. При заданных значениях температуры отдельные циклы испытаний датчика должны быть идентичны. Поскольку важно, чтобы результаты нескольких циклов испытаний при неизменных параметрах среды были независимыми друг от друга, их идентичность означает, что циклы независимы. Задача заключается в оценке степени независимости циклов испытаний, что достаточно сложно реализовать без специальных процедур анализа данных. Если циклы испытаний не являются независимыми, то построенная характеристика преобразований датчика будет содержать недопустимые погрешности, которые в итоге приведут к большой погрешности измерений. В системе мониторинга технического объекта датчики играют роль источников данных, на которых базируется управление. Завышенные погрешности измерений могут повлиять на управляемость объекта и привести к недопустимым нарушениям его работоспособности. [1, 5].

Постановка задачи. Характеристика преобразования микропроцессорного датчика давления, которая строится на основе данных испытаний, используется для измерения давления на объекте с учетом влияния основного воздействующего фактора, которым для данных датчиков является температура окружающей среды. Характеристика преобразования, реализованная в микроконтроллере датчика, представляет собой математическую модель, аппроксимирующую реальную функцию преобразования [3, 4]. Она позволяет провести вычисления давления с учетом влияния температуры на основе поступающих электрических сигналов с канала давления и канала температуры датчика [3, 4]. Таким образом, зная значения сигналов на измерительных каналах, можно вычислить давление. Если представить модель в трехмерной системе координат $P \times U_p \times U_t$, где P – давление, U_p – электрический сигнал с канала давления датчика, а U_t – электрический сигнал с канала температуры, то форма модели характеристики преобразования представляет поверхность, характеризующуюся небольшой нелинейностью как по оси U_p , так и по оси U_t , причем нелинейность по оси U_t более существенная [3].

Процесс проведения градуировочных испытаний осуществляется в несколько этапов [3, 6]. Датчик давления помещают в климатическую камеру. В камере устанавливают заданную температуру окружающей среды. Перед измерениями датчик находится в климатической камере заданное по методике время. По окончании этого периода снимается значение сигнала с канала давления температуры. Затем на датчик подается давление, равное нижней точки диапазона измерения. После подачи давления снимается электрический сигнал с канала давления. Давление изменяется от нижней точки диапазона изменения давления к верхней и в обратном направлении через равные интервалы, указанные в методике испытаний. Выполняется несколько циклов испытаний. Далее меняется температура и снова повторяется указанная выше процедура измерений. Как правило, температура изменяется от нижней границы диапазона изменений до верхней границы с установленным в методике шагом.

В результате испытаний имеется массив экспериментальных точек вида:

$$(P_{in}, U_{kin}, T_k), i = 1 \dots I, n = 1 \dots N, k = 1 \dots K,$$

где P_{in} – величина давления, T_k – электрический сигнал с канала температуры, U_{kin} – электрический сигнал с канала давления, полученный при установленных значениях давления P_{in} и температуры T_k в n -ом цикле испытаний, I – количество

устанавливаемых значений давления в одном цикле испытаний в диапазоне его изменения, K – количество температурных точек, при которых проводятся испытания, N – количество циклов испытаний при фиксированной температуре.

Нас интересуют циклы испытаний, полученные при фиксированной температуре T_m , $m \in [1, K]$, поскольку необходимо проверить независимость этих циклов друг от друга.

Из массива точек (P_{in}, U_{kin}, T_k) выделим подмассив точек при $k = m$. Он включает в себя результаты нескольких циклов испытаний:

$$\{(P_{11}, U_{m11}, T_m), \dots, (P_{I1}, U_{mI1}, T_m), \dots, (P_{IN}, U_{mIN}, T_m)\}, \quad (1)$$

где $i = 1 \dots I, n = 1 \dots N, k = m$.

При этом $\{(P_{11}, U_{m11}, T_m), \dots, (P_{I1}, U_{mI1}, T_m)\}$ – результаты отдельного, в данном случае первого по номеру, цикла испытаний;

$$i = 1 \dots I, k = m, n = 1.$$

Значения давления P в рамках каждого цикла испытаний возрастают от минимума P_{\min} ($P_{In} = P_{\min}$) до максимального значения P_{\max} ($P_{In} = P_{\max}$) и обратно.

Проверка независимости циклов испытаний заключается в том, чтобы определить, есть ли влияние предыдущих циклов испытаний на результаты последующих циклов. Кроме того, важно определить степень этого влияния, при фиксации его наличия и можно ли этим влиянием пренебречь для данного вида датчика.

Если будет определено, что результаты предыдущих циклов испытаний влияют на последующие, то циклы испытаний не являются независимыми. Построенная на таких данных характеристика преобразования будет иметь недостатки, которые отразятся на точности преобразования при вычислении давления. Как следствие, заявленные метрологические характеристика датчика не будут достигнуты и погрешность измерений будет выше заданной величины.

Метод решения задачи. Имеющиеся данные результатов испытаний не являются в полной мере временным рядом [7]. Поэтому для оценки качества результатов испытаний с помощью метода нормированного размаха нужно провести предварительную обработку данных.

Исходные данные представляют собой значения выходного электрического сигнала, снимаемого с канала давления датчика. Изменение давления на входе датчика осуществляется от нижнего значения к верхнему и обратно. Шаг изменения постоянный. Выполняется несколько циклов измерений при зафиксированной температуре окружающей среды.

Используя результаты градуировочных испытаний (1) можно для каждого значения температуры T_k построить зависимость вида $U_k = f(P_k)$. График зависимости для одного цикла испытаний с высокой точностью аппроксимируется линейной функцией [7].

Циклы испытаний многократно повторяются. Задача заключается в определении степени идентичности циклов испытаний, которые проведены при одной и той же температуре окружающей среды. Из отдельных циклов испытаний можно построить искусственный временной ряд, причем двумя различными способами.

Для оценки идентичности циклов испытаний необходимо провести анализ временного ряда [8, 9]. Предлагается для анализа использовать метод нормированного размаха или R/S-анализ, в основе которого лежит вычисление показателя Херста [10–13]. R/S-анализ является непараметрической статистикой, следовательно, не содержит требований к форме распределения, которое лежит в основе процесса [11, 12, 14]. На основе R/S-анализа можно провести классификацию ряда и, исходя из классификации, определить степень идентичности циклов испытаний.

Если вычисленный при реализации метода нормированного размаха показателя Херста $H > 0,5$, то временной ряд классифицируется как персистентный. Он обладает долговременной памятью и трендоустойчив. Если $H < 0,5$, то временной ряд является антиперсистентным и обладает выраженными фрактальными свойствами [11, 14].

Для нормированного размаха Хёрстом было определено экспериментальное соотношение, которое характерно для многих временных рядов [10, 12, 13, 15, 16, 17–21]. Это соотношение связывает между собой несколько параметров ряда [10, 13, 17, 18]:

$$R/S = (a \cdot \tau)^H, \quad (2)$$

где a – константа, обычно принимается равной 0.5 [10, 16, 17],

τ – текущее значение длины выборки,

H – показатель Хёрста,

R/S – нормированный размах.

В рамках выборки длины τ величина размаха R равна разности между максимальным и минимальным накопленными отклонениями:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min X(t, \tau), \quad t = 1 \dots \tau,$$

где $\tau = 3 \dots L$; L – длина всей выборки.

Накопленное отклонение $X(t, \tau)$ значений величины $x(i)$ от ее среднего значения $\bar{x}(\tau)$ за время t равно:

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (x(i) - \bar{x}(\tau)), \text{ где } \bar{x}(\tau) = \frac{1}{\tau} \cdot \sum_{i=1}^{\tau} x(i).$$

Стандартное отклонение данных $S(\tau)$ определено как:

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \cdot \sum_{i=1}^{\tau} (x(i) - \bar{x}(\tau))^2}.$$

Из соотношения (2) следует:

$$\log(R/S) = H \cdot \log(a \cdot \tau), \quad (3)$$

На основе соотношения (3) достаточно просто вычислить значение показателя Херста H . Для этого необходимо построить график зависимости значения $\log(R/S)$ от $\log(a \cdot \tau)$, аппроксимировать полученную кривую прямой линией с помощью метода наименьших квадратов и определить оценку показателя Хёрста H , который равен углу наклона полученной прямой [10, 12, 16, 17].

Определение значения показателя Херста позволит оценить степень повторяемости структуры временного ряда, построенного из циклов испытаний датчика, и сделать вывод о корректности результатов градуировочных испытаний.

Методика подготовки исходных данных. Для анализа качества проведенных испытаний можно использовать искусственный временной ряд.

Способ построения ряда связан со стыковкой отдельных циклов испытаний, определенных соотношением (1) так, чтобы полученный график представлял собой прямую линию, как показано на рис. 1.

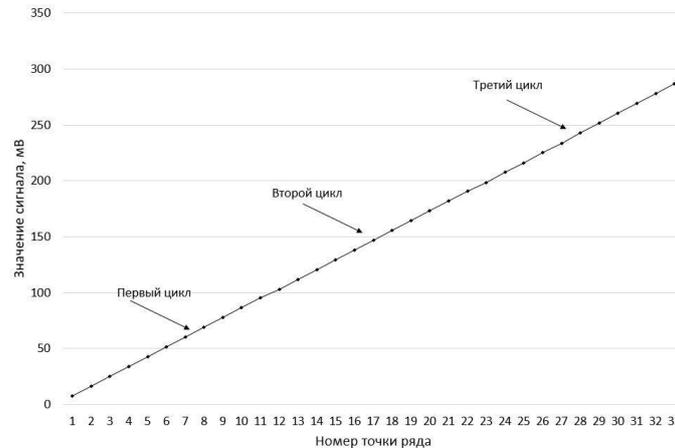


Рис. 1. Искусственный временной ряд, построенный на основе результатов нескольких циклов испытаний датчика давления (первый вариант построения)

Полученный искусственный временной ряд образован состыкованными последовательно отдельными массивами точек циклов испытаний в порядке реализации этих циклов. Номера точек временного ряда по порядку расположены на оси абсцисс. На оси ординат размещены значения выходного сигнала с канала давления для текущего цикла испытаний размещены на оси ординат. Следует отметить, что значение начальной точки текущего цикла отсчитывалось от максимального значения предыдущего цикла испытаний. Полученный таким образом временной ряд аппроксимируется линейным уравнением регрессии.

Каждому циклу испытаний соответствует отдельная часть временного ряда. Если эти составляющие будут идентичными с некоторой допустимой погрешностью, то можно говорить о независимости испытаний друг от друга. Также в этом случае можно говорить о высокой воспроизводимости результатов, что позволяет построить достаточно точную характеристику преобразования датчика с учетом влияния внешних факторов, в данном случае, температуры. В ином случае циклы испытаний не являются независимыми. В результате построенная модель характеристики преобразования не будет удовлетворять требованиям по точности.

Значение показателя Херста H для данного ряда позволит оценить качество проведенных испытаний. В целом, если показатель Херста находится в диапазоне от $0,5$ до 1 , то о ряде можно сказать, что он является персистентным и трендоустойчивым. Это означает, что возрастание ряда на начальном этапе будет продолжена на последующих этапах и наоборот [13, 16]. Чем ближе показатель Херста к 1 для рассматриваемого временного ряда, тем более выражен эффект трендоустойчивости и тем более одинаково ведут себя составляющие ряд циклы испытаний, что характеризует высокую независимость циклов испытаний друг от друга. Чем ближе H к $0,5$, тем более зашумленный и менее выраженный тренд получается на выходе.

При обработке данных временного ряда получим достаточно высокий показатель Херста, близкий к 1 . Чем ближе к верхней границе диапазона $[0, 1]$ будет находиться значение показателя Херста, тем выше степень идентичности и независимости циклов испытаний. Внешние и внутренние факторы, влияющие на датчик, приводят к погрешностям измерений. Поэтому даже при правильно проведенных испытаниях циклы испытаний не будут совсем идентичны. Кроме того, к характеристике преобразования, реализуемой в микроконтроллере датчика, предъявляют-

ся требования по точности аппроксимации реальной характеристики, которая задана массивом точек (P_{in}, U_{kin}, T_k) . Учитывая эти обстоятельства, можно определить допустимую зону изменения показателя Херста. Если значение показателя Херста находится в этой зоне, то можно говорить о идентичности циклов испытаний с учетом заданных ограничений по точности, успешности градуировочных испытаний датчика и возможности построения характеристики преобразования, соответствующей требованиям.

Выход показателя Херста за пределы зоны будет характеризовать процесс испытаний как неудовлетворительный. В этом случае целесообразно повторное проведение экспериментов. Для оценки качества испытаний предлагается определить диапазон изменения показателя H с использованием модели характеристики преобразования датчика.

Модель характеристики преобразования) может быть представлена в виде соотношений [4]:

$$P = \sum_{i=0}^2 \alpha_i^{(T)} \cdot U_P^i \quad (4)$$

$$\alpha_i^{(T)} = \sum_{k=0}^2 \gamma_{ik} \cdot U_T^k \quad (5)$$

где $\alpha_i^{(T)}$ и γ_{ik} – коэффициенты аппроксимации;

U_P и U_T – значения сигналов, снимаемых с каналов давления и температуры датчика.

В выражениях (4) и (5) коэффициенты аппроксимации $\alpha_i^{(T)}$ зависят только от температуры T , а γ_{ik} – не зависят от температуры и являются постоянными величинами для всей области определения сигналов, поступающих с каналов давления и температуры.

Искажения в поведении циклов испытаний в основном связаны с нарушениями при смене температурного режима.

При нарушении температурного режима давление вычисляется следующим образом:

$$P = \alpha_0^{(T_{np})} + \alpha_1^{(T_{np})} \cdot U_P(T_{np}) + \alpha_2^{(T_{np})} \cdot U_P^2(T_{np}), T_n \neq T_{np}, \quad (6)$$

где T_{np} – температура, при которой в действительности проводились испытания (отличная от заданной в методике испытаний).

Если же нарушений не было, то

$$P = \alpha_0^{(T_n)} + \alpha_1^{(T_n)} \cdot U_P(T_n) + \alpha_2^{(T_n)} \cdot U_P^2(T_n),$$

где T_n – температура, при которой должны проводиться испытания.

Для цикла испытаний при нарушении температурного режима значения сигналов U_P с канала давления можно определить согласно выражению (6), где коэффициенты $\alpha_i^{(T)}$ вычисляются согласно (5).

Точность аппроксимации характеристики преобразования задается техническими требованиями. На основании этих требований можно, используя соотношения (4) и (5), эту информацию можно определить диапазон возможных изменений сигнала с канала давления датчика при конкретном значении температуры. На основе полученных данных определяется верхнее и нижнее значения показателя Херста, которые соответствуют временному ряду значений сигнала для нижнего и верхнего значений диапазона изменения сигнала датчика. Допустимая зона изменения показателя Херста для конкретного значения температуры может использоваться для оценки результатов испытаний.

Диапазон допустимых значений H для конкретного значения температуры также может быть определен на основе эталонных испытаний.

Таким образом, если показатель Херста не выходит за диапазон допустимых значений, то испытания проведены успешно. В противном случае ряд циклов испытаний при заданной температуре необходимо провести повторно.

Анализ результатов испытаний с использованием метода нормированного размаха. Анализ с использованием метода нормированного размаха базировался на результатах испытаний тензорезисторного датчика разности давлений, который предназначен для измерения разности давлений от 0 до 0,6 Мпа. Температура изменялась от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Шаг изменения температуры равен 20°C .

В результате проведенного моделирования получены зависимости $\log(R/S)$ от $\log(a \cdot \tau)$ для всех значений температуры окружающей среды. Если аппроксимировать эту зависимость линейной функцией вида $y = a \cdot x + b$, то коэффициент a эквивалентен показателю Херста H .

Результаты моделирования (рис. 2) показывают, что при возрастании температуры показатель Херста также увеличивается. Эта зависимость нелинейная, что объясняется нелинейной зависимостью показаний датчика от температуры. Модель характеристики преобразования датчика представляет собой поверхность в трехмерном пространстве $P \times U_p \times U_T$ [3, 6].

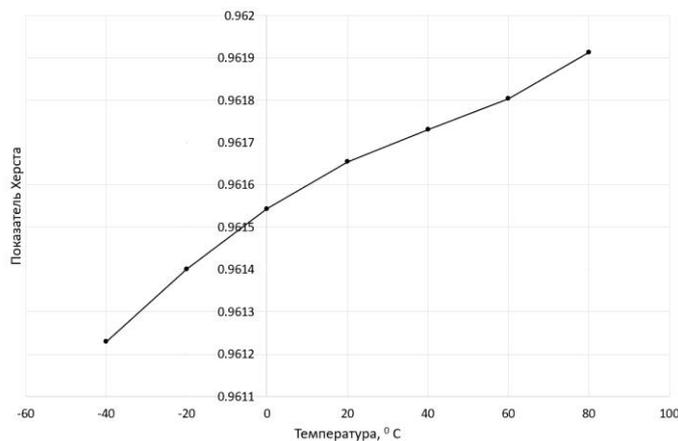


Рис. 2. Изменение показателя Херста в зависимости от температуры

Если рассматривать поведение показателя Херста в зависимости от объема выборки, то с увеличением выборки показатель сначала быстро растет. Далее его рост уменьшается и при достаточном количестве точек ряда в выборке график зависимости показателя от количества точек временного ряда выходит на плато. На рис. 3 представлена зависимость показателя Херста при температуре $T = -40^{\circ}\text{C}$.

Величина показателя Херста составляет 0.9612299, что близко к 1 и означает высокую трендоустойчивость ряда.

Пусть точность аппроксимации характеристики преобразования датчика составляет 0,5%. На основе представленной выше методике может быть определен диапазон допустимых значений H для конкретного значения температуры. Тогда, например, для температуры $T = -40^{\circ}\text{C}$ для данного типа датчика диапазон допустимых значений H равен:

$$0,9610175 < H < 0,9614104. \quad (7)$$

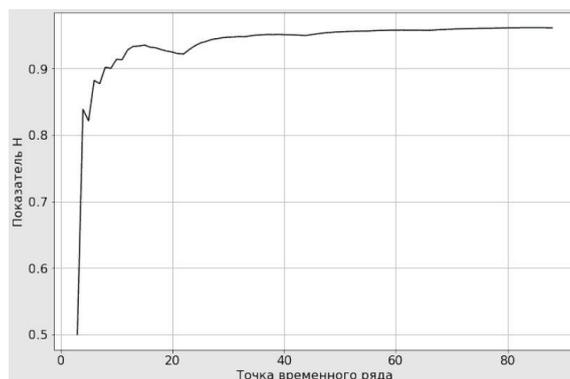


Рис. 3. Изменение показателя Херста от количества точек временного ряда градуировочных испытаний датчика при температуре $T = -40^{\circ}\text{C}$

Изменение формы цикла испытаний при нарушениях методики проведения испытаний приводит к изменению значения показателя Херста. Предположим, что показатель находится в допустимом диапазоне значений (7). Следовательно, влияние нарушений методики незначительно и не повлияет существенным образом на качество испытаний. Для оценки чувствительности показателя Херста к изменению формы цикла испытаний можно использовать воспроизводимость [22]:

$$\delta_r = \frac{\Delta m}{FS} \cdot 100\%,$$

где Δm – максимальная разница выходных значений сигнала с датчика, полученных в двух циклах испытаний, FS – диапазон выходного сигнала датчика.

В случае влияния температуры предыдущего цикла на выходной сигнал датчика значение Δm увеличивается. Это увеличение заметно на начальном участке цикла. Компьютерное моделирование показывает, что показатель Херста не соответствует ограничениям (7) при увеличении разброса сигнала на начальном участке цикла $\delta_r > 2,1\%$, что соответствует $\Delta m > 2,15$ мВ. Результаты приведены на рис. 4.

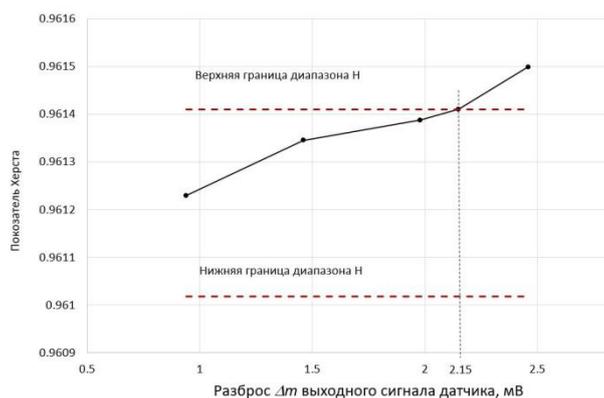


Рис. 4. Изменение показателя Херста от разброса Δm выходного сигнала при $T = -40^{\circ}\text{C}$

При увеличении значения Δm показатель Херста увеличивается, приближаясь к значению, соответствующему другой температуре окружающей среды.

Заключение. Представлен способ определения качества результатов градуировочных испытаний микропроцессорного датчика давления, влияющих на точность аппроксимации его характеристики преобразования и погрешность измерений. Метод позволяет оценить влияние предыдущих циклов испытаний на последующие при нарушении условий их проведения. Если такое влияние обнаружено, то можно говорить о взаимной зависимости циклов испытаний и, возможно, о недостоверности полученных данных. Построенная на недостоверных данных характеристика преобразования датчика будет значительно отличаться от реальной, что негативно повлияет на метрологические характеристики датчика.

В основе способа, представленного в работе, лежит метод нормированного размаха. Анализ подвергается искусственный временной ряд, сформированный с использованием данных испытаний. Для построения была реализована специализированная процедура соединения отдельных циклов в единую структуру, аналогичную временному ряду. Для каждого фиксированного значения температуры был построен отдельный временной ряд. Поскольку полученный временной ряд представляет собой линейную функцию, его показатель Херста должен быть близким к единице. В этом случае ряд является персистентным и трендоустойчивым, то есть отдельные циклы испытаний формируют единый линейный тренд с незначительными отклонениями от него. Результаты испытаний в этом случае можно использовать для построения качественной градуировочной характеристики.

В процессе испытаний могут быть нарушены существенные условия их проведения. Наиболее критично в этом плане нарушение условий перехода от одного температурного режима к другому. В этом случае на результаты текущего цикла испытаний будут влиять температурные условия предыдущего цикла. Для определения таких нарушений необходимо сравнить показатель Херста временного ряда, в котором присутствуют данные предполагаемого плохого цикла испытаний, с диапазоном допустимых значений. Этот диапазон формируется на основе обработки результатов эталонных циклов испытаний. Если показатель Херста не соответствует ограничениям, то на результаты анализируемого цикла повлияли условия предыдущего цикла испытаний и рекомендуется провести повторные циклы испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Klevtsov S.I.* Identification of the State of Technical Objects Based on Analyzing a Limited Set of Parameters // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 - Proceedings. – 2016. – P. 749-752.
2. *Lihua Sun, Yingjun Guo, Haichao Ran.* A New Method of Early Real-Time Fault Diagnosis for Technical Process // Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference. Wuhan, China, 2010. – P. 4912-4915.
3. *Клевцов С.И.* Мульти сегментная пространственная аппроксимация градуировочной характеристики микропроцессорного датчика // Метрология. – 2011. – Вып. 7. – С. 26-36.
4. *Шапонич Д., Жигич А.* Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 1. – С. 54-60.
5. *Bluemm C., Weiss R., Weigel R. and Brenk D.* Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling // 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings. Bari, Italy, 2010. – P: 3356-3361. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/5637991>.
6. *Klevtsov S.I., Udod Y.V.* Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Russia, Omsk, 2015. – <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7,147,097>.
7. *Klevtsov Sergei.* Using the Method of Normalized Amplitude for Assessing the Quality of the Calibration Tests of the Pressure Sensor // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, Russia, 2019. – P. 197-199.

8. Сидоров С.Г., Никологорская А.В. Анализ временных рядов как метод построения прогноза потребления электроэнергии // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 1-3.
9. Matuszewski J. Application of clustering methods for recognition of technical objects // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2010 International Conference. – 2010. – P. 39-40.
10. Hurst H.E. Long-term storage of reservoirs: an experimental study // Transactions of the American Society of Civil Engineers. – 1951. – Vol. 116. – P. 770-799.
11. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
12. Мельникова Ю.В. Предпрогнозный анализ временных рядов методами непараметрической статистики Херста // Аграрный научный журнал. – 2014. – № 10. – С. 73-76.
13. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000.
14. Jerzy Wawszczak. Methods for estimating the Hurst exponent. The analysis of its value for fracture surface research // Materials Science-Poland. – 2005. – Vol. 23, No. 2. – P. 585-591.
15. Cousins N.P., Loginov V.M. The use of the normalized scope method in the analysis of speech pathologies of neurological genesis // Computer research and modeling. – 2014. – Vol. 6, No. 5. – P. 775-791.
16. Кириченко Л., Чалая Л. Комплексный подход к исследованию фрактальных временных рядов // International Journal "Information Technologies & Knowledge". – 2014. – Vol. 8, No. 1. – P. 22-28.
17. Антипов О.И., Неганов В.А. Применение метода нормированного размаха Хёрста к анализу стохастических временных рядов в импульсных стабилизаторах напряжения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 78-85.
18. Кузнецов Н.П., Логинов В.М. Использование метода нормированного размаха при анализе речевых патологий неврологического генеза // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 5. – С. 775-791.
19. Cervantes-De la Torre F., Gonzalez-Trejo J.I., Real-Ramirez C.A., Hoyos-Reyes L.F. Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – No. 475. – P. 1-10.
20. Bassingthwaight James B., Raymond Gary M. Evaluation of the Dispersional Analysis Method for Fractal Time Series // Ann Biomed Eng. – 1995. – Vol. 23 (4). – P. 491-505.
21. Ceballos Roel F., Largo Fe F. On the Estimation of the Hurst Exponent Using Adjusted Rescaled Range Analysis, Detrended Fluctuation Analysis and Variance Time Plot: A Case of Exponential Distribution // Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR). – 2017. – Vol. 3, Issue 8. – P. 424-434.
22. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.

REFERENCES

1. Klevtsov S.I. Identification of the State of Technical Objects Based on Analyzing a Limited Set of Parameters, 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings, 2016, pp. 749-752.
2. Lihua Sun, Yingjun Guo, Haichao Ran. A New Method of Early Real-Time Fault Diagnosis for Technical Process, Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference. Wuhan, China, 2010, pp. 4912-4915.
3. Klevtsov S.I. Multisegmentnaya prostranstvennaya approksimatsiya graduirovnoy kharakteristiki mikroprotsessornogo datchika [Multisegment spatial approximation of the calibration characteristic of a microprocessor sensor], Metrologiya [Metrology], 2011, Issue 7, pp. 26-36.
4. Shaponich D., Zhigich A. Korrektsiya p'ezorezistivnogo datchika davleniya s ispol'zovaniem mikrokontrollera [Correction of a piezoresistive pressure sensor using a microcontroller], Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and experimental techniques], 2001, No. 1, pp. 54-60.
5. Bluemm C., Weiss R., Weigel R. and Brenk D. Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling, 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings. Bari, Italy, 2010, pp: 3356-3361. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5637991>.
6. Klevtsov S.I., Udod Y.V. Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors, 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Russia, Omsk, 2015. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7,147,097>.

7. *Klevtsov Sergei*. Using the Method of Normalized Amplitude for Assessing the Quality of the Calibration Tests of the Pressure Sensor, *2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. Yekaterinburg, Russia, 2019, pp. 197-199.
8. *Sidorov S.G., Nikolgorokskaya A.V.* Analiz vremennykh ryadov kak metod postroeniya prognoza potrebleniya elektroenergii [Time series analysis as a method for constructing a forecast of electricity consumption], *Vestnik IGEU* [Bulletin of the Institute of Power Engineering], 2010, Issue 3, pp. 1-3.
9. *Matuszewski J.* Application of clustering methods for recognition of technical objects, *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, 2010 International Conference, 2010, pp. 39-40.
10. *Hurst H.E.* Long-term storage of reservoirs: an experimental study, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, Vol. 116, pp. 770-799.
11. *Feder E.* Fraktaly [Fractals]: transl. from engl. Moscow: Mir, 1991, 254 p.
12. *Mel'nikova Yu.V.* Predprognoznnyy analiz vremennykh ryadov metodami neparametricheskoy statistiki Khersta [Pre-forecast analysis of time series using non-parametric Hurst statistics], *Agramyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian scientific journal], 2014, No. 10, pp. 73-76.
13. *Kronover R.M.* Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh. Osnovy teorii [Fractals and chaos in dynamic systems. Basics of the theory]. Moscow: Postmarket, 2000.
14. *Jerzy Wawszczak.* Methods for estimating the Hurst exponent. The analysis of its value for fracture surface research, *Materials Science-Poland*, 2005, Vol. 23, No. 2, pp. 585-591.
15. *Cousins N.P., Loginov V.M.* The use of the normalized scope method in the analysis of speech pathologies of neurological genesis, *Computer research and modeling*, 2014, Vol. 6, No. 5, pp. 775-791.
16. *Kirichenko L., Chalaya L.* Kompleksnyy podkhod k issledovaniyu fraktal'nykh vremennykh ryadov [An integrated approach to the study of fractal time series], *International Journal "Information Technologies & Knowledge"*, 2014, Vol. 8, No. 1, pp. 22-28.
17. *Antipov O.I., Neganov V.A.* Primenenie metoda normirovannogo razmakha Khersta k analizu stokhasticheskikh vremennykh ryadov v impul'snykh stabilizatorakh napryazheniya [Application of the normalized Hurst range method to the analysis of stochastic time series in pulsed voltage stabilizers], *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems], 2009, Vol. 12, No. 3, pp. 78-85.
18. *Kuzenkov N.P., Loginov V.M.* Ispol'zovanie metoda normirovannogo razmakha pri analize rechevykh patologiy nevrologicheskogo gena [Using the normalized range method in the analysis of speech pathologies of neurological origin], *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling], 2014, Vol. 6, No. 5, pp. 775-791.
19. *Cervantes-De la Torre F., Gonz'alez-Trejo J.I., Real-Ramirez C.A., Hoyos-Reyes L.F.* Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena, *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, No. 475, pp. 1-10.
20. *Bassingthwaighte James B., Raymond Gary M.* Evaluation of the Dispersional Analysis Method for Fractal Time Series, *Ann Biomed Eng.*, 1995, Vol. 23 (4), pp. 491-505.
21. *Ceballos Roel F., Largo Fe F.* On the Estimation of the Hurst Exponent Using Adjusted Rescaled Range Analysis, Detrended Fluctuation Analysis and Variance Time Plot: A Case of Exponential Distribution, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 2017, Vol. 3, Issue 8, pp. 424-434.
22. *Frayden Dzh.* Sovremennye datchiki. Spravochnik [Modern sensors. Directory]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 592 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

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

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