

УДК 519.876.5

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИСПЫТАНИЙ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НОРМИРОВАННОГО РАЗМАХА

Клевцов С.И. (Таганрог)

### Введение

Датчики давления используются во многих отраслях науки и техники. В настоящее время наиболее перспективным направлением является создание микропроцессорных датчиков, в которых для предварительной обработки физических сигналов используются микроконтроллерные системы. Одним из основных требований к датчикам, в том числе микропроцессорным, является требование высокой точности измерений. В значительной степени она определяется точностью аппроксимации характеристики преобразования датчика. Для микропроцессорного датчика давления строится математическая модель характеристики преобразования, которая имитирует реальную характеристику. Высокая точность измерений, проводимых с помощью микропроцессорного датчика давления, в значительной степени зависит от точности построения имитационной модели его характеристики преобразования [1].

Характеристика преобразования строится на основе результатов градуировочных испытаний, которые проводятся по отдельной специальной методике [2]. В случае отклонений от методики результаты будут неверными, а построенная имитационная модель не позволит получить требуемые характеристики по точности. Также методика может содержать ошибки, которые приведут к неудовлетворительному результату и окажут негативное влияние на модель характеристики преобразования. Метрологические характеристики в этом случае ухудшаются, в частности, увеличивается погрешность измерений.

Влияние отклонений от методики в процессе проведения испытаний сложно идентифицировать. Также сложно выявить недостатки методики, основываясь на результатах испытаний, поскольку, может показаться, что не достижение требуемых характеристик может быть связано с несовершенством первичного преобразователя, электрической схемы, программного обеспечения, ограничениями элементной базы и т.д. Градуировочные испытания проводят при фиксированных параметрах окружающей среды, таких как температура, влажность, поскольку они достаточно сильно влияют на характеристики датчика. При заданных значениях параметров окружающей среды отдельные циклы испытаний датчика должны быть идентичны, что означает, что эти циклы независимы и не влияют друг на друга. Однако оценить степень независимости циклов испытаний достаточно сложно без специальных процедур анализа данных. При допущенных нарушениях методики испытаний требуемая погрешность характеристики преобразования будет не соответствовать фактической. Это, в свою очередь может повлиять на работоспособность сложных технических объектов, отслеживание параметров которых осуществляется с помощью систем мониторинга [3].

### Постановка задачи

В микропроцессорных датчиках результат измерения физического сигнала вычисляется с помощью модели характеристики преобразования, в которой помимо основного фактора, давления, учитывается основной дестабилизирующий фактор [1, 2]. Для датчиков давления – это температура окружающей среды [2]. Модель характеристики преобразования представляет собой функциональное соотношение, связывающее между собой значения электрических сигналов, поступающих с каналов

давления и температуры датчика, со значением физического сигнала, в данном случае, давления [1, 2]. Таким образом, зная значения сигналов на измерительных каналах, можно вычислить давление. Модель в графическом виде можно рассматривать как поверхность, построенную в системе трех координат.

Процедура построения такой модели пространственной характеристики преобразования датчика состоит из нескольких этапов. Испытываемый датчик размещают в климатической камере, в которой устанавливают заданную температуру окружающей среды. Датчик перед измерениями выдерживается при данной температуре определенное в методике испытаний время. С помощью специального устройства на первичный преобразователь датчика подается заданное давление. Проводятся измерения значений электрических сигналов, поступающих с канала давления и канала температуры. При фиксированной температуре давление изменяется от минимального до максимального и обратно с шагом, установленным в методике испытаний. Выполняется несколько циклов испытаний. Затем температуры изменяется, датчик выдерживается при этой температуре заданное время и далее процедура изменения давления и съема сигналов осуществляется аналогично описанной выше схеме. Как правило, температура изменяется от нижней границы диапазона изменений до верхней границы с установленным в методике шагом.

В методике определены условия, при которых циклы испытаний можно считать независимыми. Если при проведении испытаний будут нарушены эти условия или в методике есть неточности, то возможно, результаты текущих испытаний будут зависеть от предыдущих циклов испытаний. Это приведет к неточностям модели пространственной характеристики преобразования датчика и искажению показаний датчика. Не допустить подобную ситуацию особенно важно для высокоточных датчиков давления.

Таким образом, 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  $P_{in}$  – заданная величина давления,  $T_k$  – электрический сигнал с канала температуры,  $U_{kin}$  – электрический сигнал с канала давления, полученный при воздействии 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.

Выделим результаты испытаний, полученные при заданной температуре  $T_m$ ,  $m \in [1, K]$ .

Полученный массив точек  $(P_{in}, U_{kin}, T_k), i = 1 \dots N, k = m$  включает в себя результаты нескольких циклов испытаний:

$$\{(P_{11}, U_{m11}, T_m), \dots, (P_{I1}, U_{mI1}), \dots, (P_{IN}, U_{mIN}, T_m)\}, i = 1 \dots I, n = 1 \dots N, k = m, \quad (1)$$

где  $\{(P_{11}, U_{m11}, T_m), \dots, (P_{I1}, U_{mI1}), \dots\}$  – результаты отдельного, в данном случае первого по номеру, цикла испытаний;  $i = 1 \dots I, k = m, n = 1$ ;

Значения  $P$  в цикле возрастают от минимума  $P_{min}$  ( $P_{1n} = P_{min}$ ) до максимального значения  $P_{max}$  ( $P_{In} = P_{max}$ ) и обратно.

Задача заключается в том, чтобы определить, есть ли влияние предыдущих циклов испытаний на результаты последующих циклов. Также важно определить, насколько велико это влияние, если ли оно присутствует, и можно ли этим влиянием пренебречь для данного вида датчика.

Если результаты предыдущих испытаний влияют на последующие, то циклы испытаний не являются независимыми. В этом случае метрологические параметры характеристики преобразования датчика, полученной в результате испытаний, будет

отличаться от заявленных. Следствием этого будет увеличение погрешности измерений выше заданной величины.

### Метод решения задачи

На основе результатов испытаний (1) можно построить зависимость вида  $U_k = f(P_k)$  для каждого значения температуры  $T_k$ . График зависимости для одного цикла испытаний аппроксимируется прямой линией.

Циклы испытаний многократно повторяются. Если построенные для каждого цикла испытаний (при изменении давления от минимального к максимальному значению) уравнения регрессии будут идентичными с некоторой допустимой погрешностью, то можно говорить о независимости испытаний друг от друга и высокой воспроизводимости результатов, характеристики датчика, в значительной степени определяющей его точность и возможность использования для измерения физических сигналов. Учитывая это обстоятельство, для анализа качества проведения испытаний предлагается построить искусственный временной ряд, состыковав последовательно отдельные массивы точек циклов испытаний в порядке реализации этих циклов, как показано на рис. 1.

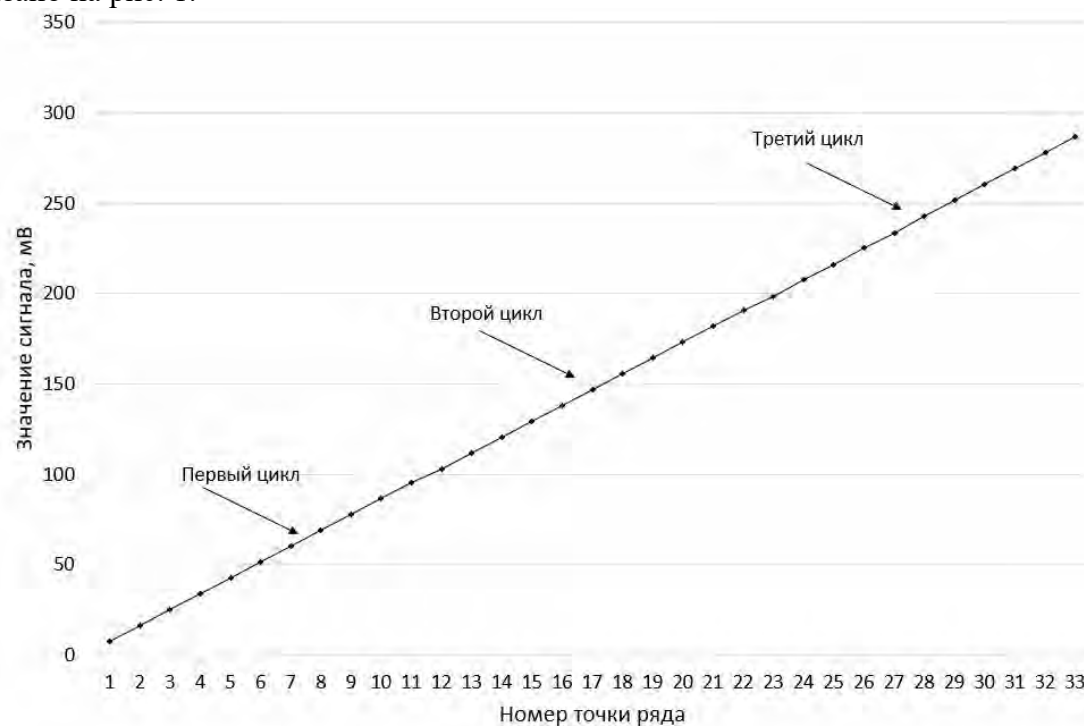


Рис.1. Ряд, построенный на основе результатов нескольких циклов испытаний датчика давления

На оси абсцисс отложены номера точек временного ряда по порядку. На оси ординат размещены значения выходного сигнала текущего цикла испытаний, причем значение начальной точка текущего цикла отсчитывалось от максимального значения предыдущего цикла испытаний. Полученный таким образом временной ряд аппроксимируется линейным уравнением регрессии.

Этот ряд имеет множество повторяющихся участков. Если повторяющиеся участки данного ряда будут идентичны друг другу с заданной погрешностью, то можно говорить о независимости циклов испытаний. В противном случае циклы испытаний не являются независимыми, а построенная на их основе модель характеристики преобразования не будет удовлетворять требованиям по точности.

Для оценки идентичности циклов ряда будем использовать метод нормированного размаха или R/S анализ [4, 5, 6, 7]. R/S-анализ является непараметрической статистикой, следовательно, не содержит требований к форме распределения, которое лежит в основе процесса [6]. Вычисление показателя Херста  $H$  позволяет провести классификацию временного ряда. Если показатель  $H > 0,5$ , то временной ряд является персистентным и обладает долговременной памятью. Если  $H < 0,5$  ряд является антиперсистентным и обладает выраженными фрактальными свойствами [5, 7].

Соотношение для нормированного размаха, которое характерно для многих временных рядов, связывает между собой несколько параметров ряда [4, 6, 8, 9]:

$$R/S = (a \cdot \tau)^H, \quad (1)$$

где  $a$  – некоторая константа, обычно принимается равной 0.5 [5, 6],  $\tau$  – текущее значение длины выборки,  $H$  – показатель Хёрста,  $R/S$  – нормированный размах.

В рамках текущей выборки длины  $\tau$  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 (1) следует:

$$\log(R/S) = H \cdot \log(a \cdot \tau), \quad (1)$$

Для каждого временного ряда можно вычислить его показатель Херста  $H$  как коэффициент регрессии логарифма нормированного накопленного размаха к логарифму длины выборки. Таким образом, после построения графика зависимости значения  $\log(R/S)$  от  $\log(a \cdot \tau)$  и аппроксимации с помощью метода наименьших квадратов можно определить оценку показателя Хёрста  $H$ , который равен углу наклона полученной прямой [4, 9, 10, 11].

После оценки значения показателя Херста можно оценить степень повторяемости структур ряда и сделать вывод о корректности результатов испытаний.

Если  $0,5 < H < 1$ , то рассматриваемый временной ряд является персистентным и трендоустойчивым, то есть временной ряд характеризуется эффектом долговременной памяти. Если ряд начал возрастать, следовательно, он будет возрастать и дальше, если он убывает, то далее тоже будет убывать [7]. Трендоустойчивость тем больше, чем ближе  $H$  к 1, потому что чем больше корреляция между процессами, тем более одинаково они себя ведут. Чем ближе  $H$  к 0,5, тем более зашумленный и менее выраженный тренд получается на выходе.

Если для построенного на основе результатов испытаний ряда фиксируется высокое значение показателя Херста, то это означает, что линия регрессии близка к уравнению прямой с незначительными отклонениями. Следовательно, отдельные циклы испытаний идентичны между собой. Чем выше  $H$ , тем меньше различий между циклами. В этом случае можно говорить об успешных градуировочных испытаниях датчика и возможности построения правильной характеристики преобразования.

Если же отдельные циклы испытаний были проведены с нарушениями, показатель Херста в этом случае снизится. Если известна допустимая зона изменения показателя  $H$ , то его выход за пределы зоны будет характеризовать процесс испытаний как неудовлетворительный, когда целесообразно повторное проведение экспериментов.

Для оценки качества испытаний предлагается имитировать характеристику преобразования датчика и определить диапазон изменения показателя  $H$ .

В качестве метода построения имитационной модели характеристики преобразования датчика предлагается использовать метод мультисегментной пространственной аппроксимации характеристики преобразования микропроцессорного датчика [2], но упростить его, используя без разбивки на отдельные сегменты [1].

Модель характеристики преобразования) может быть представлена в виде матричного уравнения [1, 2]:

$$P = \begin{pmatrix} \gamma_{00} & \gamma_{01} & \gamma_{02} \\ \gamma_{10} & \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{20} & \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ U_T \\ U_T^2 \end{pmatrix} \cdot (1 \quad U_P \quad U_P^2),$$

или

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

$$\alpha_i^{(T)} = \sum_{k=0}^2 \gamma_{ik} \cdot U_T^k \quad (3)$$

где  $\alpha_i^{(T)}$  и  $\gamma_{ik}$  – коэффициенты аппроксимации для представления характеристики преобразования в области определения  $\Omega$  изменение сигналов с каналов давления и температуры, причем коэффициенты аппроксимации  $\alpha_i^{(T)}$  зависят только от температуры  $T$ , а  $\gamma_{ik}$  – не зависят от температуры и являются постоянными величинами для всей области определения  $\Omega$ ;

$U_P$  и  $U_T$  – значения сигналов канала давления и канала температуры датчика.

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

Если при нормальном проведении испытаний выражение (2) выглядит следующим образом:

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

то при нарушении температурного режима

$$P = \alpha_0^{(T_{np})} + \alpha_1^{(T_{np})} \cdot U_P(T_{np}) + \alpha_2^{(T_{np})} \cdot U_P^2(T_{np}), \quad T_n \neq T_{np}, \quad (4)$$

где  $T_n$  – температура, при которой должны проводиться испытания;

$T_{np}$  – температура, при которой в действительности проводились испытания.

Для цикла испытаний при нарушении температурного режима значения сигналов  $U_P$  с канала давления можно определить согласно выражению (4), где коэффициенты  $\alpha_i^{(T)}$  вычисляются согласно (3).

При построении модели характеристики преобразования датчика в соответствии с соотношениями (2) и (3) задается точность аппроксимации характеристики [1, 2], используя которую можно определить диапазон возможных изменений сигнала с канала давления датчика при конкретном значении температуры. На этой основе определяется верхнее и нижнее значения показателя Херста, которые соответствуют временному ряду значений сигнала для нижнего и верхнего значений диапазона изменения сигнала датчика. Полученную таким образом допустимую зону изменения

показателя Херста для конкретного значения температуры можно использовать для оценки результатов испытаний. Также диапазон допустимых значений  $H$  для конкретного значения температуры может быть определен на основе достаточно большого количества испытаний.

Если полученный в процессе испытаний при конкретной температуре показатель Херста не выходит за диапазон допустимых значений, то испытания проведены успешно. В противном случае группу циклов испытаний при данной температуре необходимо провести повторно.

### Анализ результатов испытаний с использованием показателя Херста

В качестве исходных данных для моделирования использовались результаты испытаний экспериментального датчика разности давлений, рассчитанного на измерения давления до 0,6 Мпа. Температура изменялась от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  с шагом  $20^{\circ}\text{C}$ . Пример зависимости  $\log(R/S)$  от  $\log(a \cdot \tau)$  приведен на рис. 2.

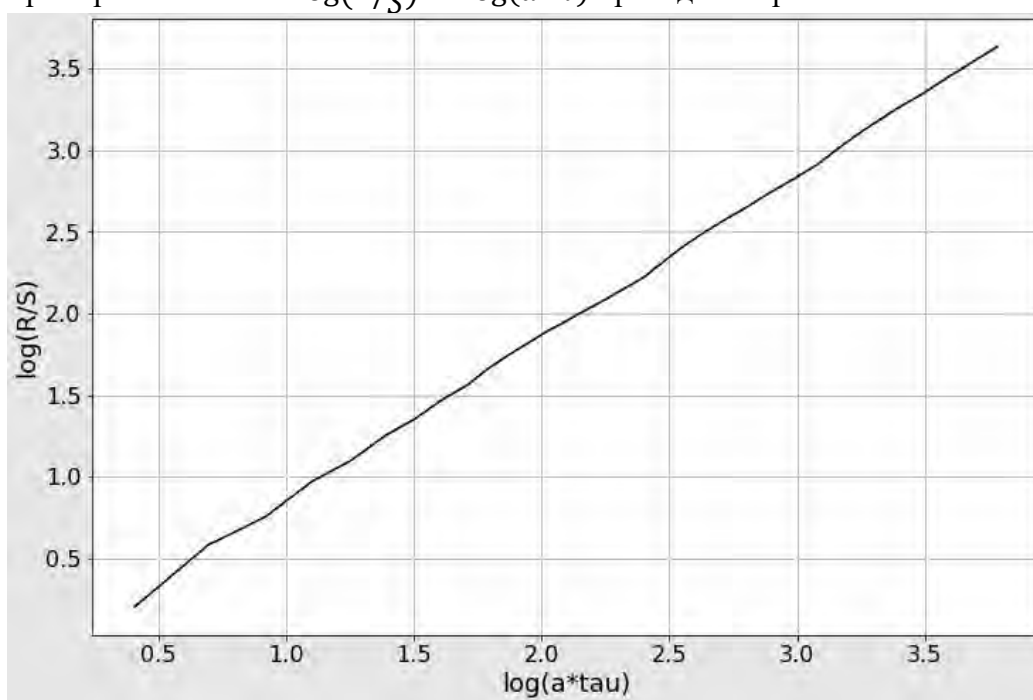


Рис. 2. Пример зависимости для оценки показателя Херста

Используя выражение (1), можно рассчитать показатель Херста для рядов результатов испытаний, полученных при различных температурах окружающей среды. Результаты моделирования (рис. 3) показывают, что при возрастании температуры показатель Херста также увеличивается, но эта зависимость нелинейная. Это объясняется нелинейной зависимостью показаний датчика от температуры. Модель характеристики преобразования датчика представляет собой выпуклую поверхность в трехмерном пространстве  $P \times U_P \times U_T$  [1, 2].

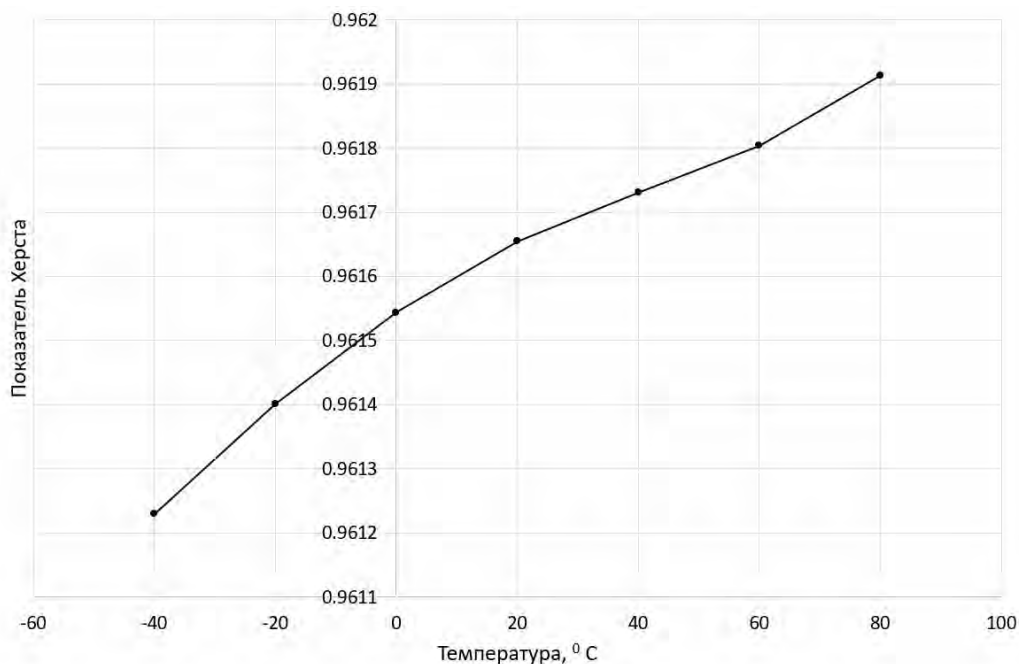


Рис. 3. Изменение показателя Херста в зависимости от температуры

Показатель Херста сильно зависит от объема выборки точек временного ряда, на основании которой он рассчитывается. 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. 4 представлена зависимость показателя Херста для температуры  $T = -20^{\circ}\text{C}$ .

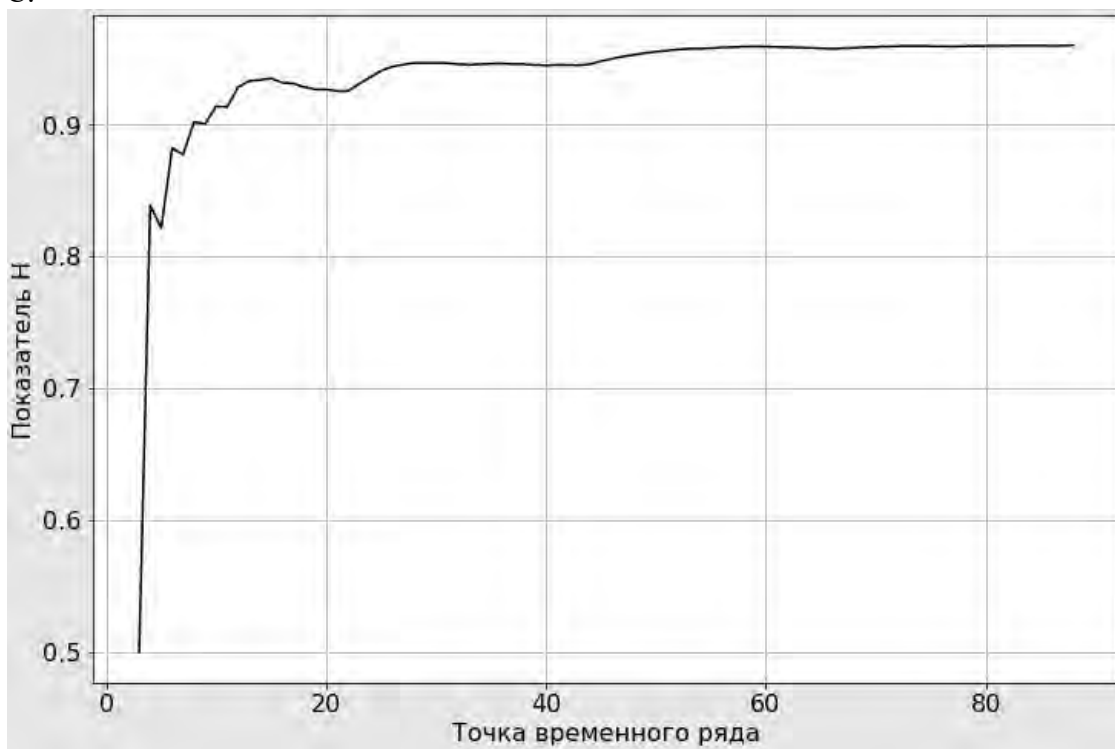


Рис. 4. Изменение показателя Херста от количества точек временного ряда градуировочных испытаний датчика при температуре  $T = -20^{\circ}\text{C}$

Величина показателя Херста составляет 0.96140103, что близко к 1 и означает высокую трендоустойчивость ряда.

На основе представленной выше методике может быть определен диапазон допустимых значений  $H$  для конкретного значения температуры.

Пусть точность аппроксимации характеристики преобразования датчика составляет 0,5%. Тогда, например, для температуры  $T = -20^{\circ}\text{C}$  для данного типа датчика диапазон допустимых значений  $H$  равен:

$$0,96131985 < H < 0,96150043 \quad (5)$$

Для оценки чувствительности показателя Херста к изменению формы цикла испытаний можно использовать воспроизводимость. Эта метрологическая характеристика определяет отличие выходных сигналов датчика в двух циклах испытаний:

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

где  $\Delta m$  - 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  $\Delta m$  увеличивается. Это увеличение заметно на начальном участке цикла. Компьютерное моделирование показывает, что показатель Херста не соответствует ограничениям (5) при увеличении разброса сигнала на начальном участке цикла  $\delta_r > 2,5\%$ , что соответствует  $\Delta m > 2,64$  мВ. Результаты приведены на рис. 4.

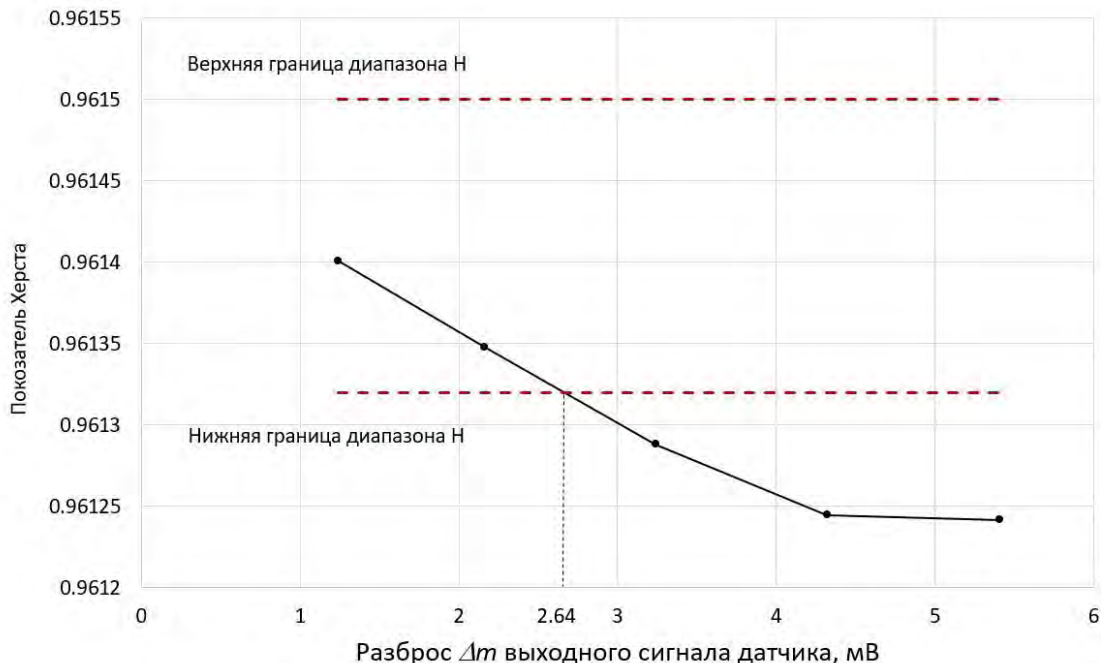


Рис. 4. Изменение показателя Херста от разброса  $\Delta m$  выходного сигнала при  $T = -20^{\circ}\text{C}$

При увеличении значения  $\Delta m$  показатель Херста уменьшается, приближаясь к значению, соответствующему другой температуре окружающей среды.

### Заключение

Представлен способ оценки качества результатов градуировочных испытаний датчика давления. В результате оценки можно определить, влияют или нет результаты предыдущих испытаний на последующие результаты. Если такая зависимость существует, то циклы испытаний не являются независимыми. Это может привести к снижению метрологических характеристик датчика, поскольку построенная градуировочная характеристика будет значительно отличаться от реальной.



Предлагаемый способ основан на использовании метода нормированного размаха. Показатель Херста для ряда, построенного на основе результатов нескольких циклов испытаний при фиксированной температуре окружающей среды должен быть близким к единице. В этом случае ряд является персистентным. Результаты испытаний в этом случае можно использовать для построения качественной градуировочной характеристики. Другое значение показателя Херста означает нарушения при проведении измерений или наличие недостатков методики испытаний.

В процессе испытаний могут быть нарушены существенные условия их проведения. Например, могут быть нарушены условия перехода к испытаниям 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 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.

### Литература

1. Шапонич Д., Жигич А. Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 1. С. 54–60.
2. 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. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7,147,097>.
3. Lihua Sun, Yingjun Guo, Haichao Ran A New Method of Early Real-Time Fault Diagnosis for Technical Proces // Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference. 2010. Wuhan, China. P. 4912–4915.
4. 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.
5. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
6. Мельникова Ю.В. Предпрогнозный анализ временных рядов методами непараметрической статистики Херста // Аграрный научный журнал. 2014. № 10. С.73–76
7. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: Постмаркет, 2000.
8. 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
9. 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, № 5. P. 775–791
10. Кириченко Л., Чалая Л. Комплексный подход к исследованию фрактальных временных рядов // Information Technologies & Knowledge. 2014. Vol. 8, №1. С. 22–28
11. 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