

Оценка испытаний датчика давления с использованием методов фрактального анализа

С.И. Клевцов

Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета,
г. Таганрог, sergkmps@mail.ru

Аннотация — Погрешность измерений микропроцессорного датчика давления зависит от правильности построения его характеристики преобразования, которая формируется на основе результатов градуировочных испытаний. В процессе градуировочных испытаний возможны отклонения от установленной методики, которые могут привести к неточностям характеристики преобразования и, как следствие, к ухудшению метрологических характеристик датчика. Для оценки качества характеристики преобразования предложено использовать методы фрактального анализа. В процессе испытаний данные с датчика давления снимаются циклически при фиксированных значениях параметров среды. Результаты нескольких циклов испытаний при неизменных параметрах среды должны быть независимыми друг от друга и аналогичными по форме. Оценка степени повторяемости формы циклов испытаний и их взаимной независимости определяется с помощью показателя Херста.

Ключевые слова — характеристика преобразования, показатель Херста, датчик, давление, испытание, временной ряд.

I. ВВЕДЕНИЕ

Высокая точность измерений, проводимых с помощью микропроцессорного датчика давления, в значительной степени зависит от правильности построения его характеристики преобразования [1]. Эта характеристика формируется на основе результатов градуировочных испытаний [1, 2]. Испытания проводятся по специальной методике. Даже незначительные отклонения от методики могут привести к снижению эффективности характеристики. При этом ухудшаются метрологические характеристики датчика, в частности, увеличивается погрешность измерений.

К сожалению, влияние отклонений от методики на точность построения характеристики преобразования сложно идентифицировать. Данные с датчика давления в процессе испытаний снимаются при фиксированных значениях параметров среды, таких как температура, влажность. Результаты нескольких циклов испытаний при неизменных параметрах среды должны быть независимыми друг от друга, форма графика различных циклов испытаний должна быть идентична.

Однако допущенные нарушения сложно зафиксировать визуально, необходима специальная процедура. В случае нарушений заявленная и отраженная в документации норма погрешности характеристики преобразования будет не соответствовать фактической. Это в значительной степени повлияет на работоспособность технических систем, контроль и прогнозирование параметров которых осуществляют системы мониторинга [3, 4].

II. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Для микропроцессорных датчиков актуально построение пространственных градуировочных характеристик, в которых наряду с измеряемым фактором важное значение играет основной дестабилизирующий фактор [1].

Для датчиков давления это температура. Градуировочная характеристика в этом случае представляет собой функцию, определяющую измеряемое давление на объекте в зависимости от значений электрических сигналов, поступающих из канала температуры и канала давления датчика [5, 6].

Для построения пространственной характеристики обычно прибегают к следующей схеме проведения испытаний. Датчик размещают в климатической камере, дополненной устройством формирования заданного давления на первичном измерительном преобразователе датчика. Устанавливается температура окружающей среды, равная нижней границе диапазона температур. Датчик выдерживается при этой температуре определенное методикой время. Далее на вход датчика подается давление согласно методике, проводятся измерения выходных параметров, сигнала из канала давления и температуры. Иногда вместо съема сигнала из канала температуры просто фиксируется температура. Давление ступенчато повышается до максимума, затем от максимума до минимума. Выполняется несколько таких циклов измерений. Затем температура ступенчато повышается, и процедура измерений повторяется.

Методика определяет условия, при которых эти циклы можно считать независимыми. Любые отклонения от условий, либо неправильные условия, могут привести к тому, что результаты последующих испытаний будут зависеть от предыдущих. Это может привести к формированию некачественной

характеристики, что в дальнейшем приведет к искажению показаний датчика.

Пусть имеются результаты испытаний датчика давления в виде $U = f(P, T)$, где U – выходной электрический сигнал, P – измеряемый параметр (давление), T – температура.

Выделим результаты испытаний, полученные при заданной температуре T_k . Полученный массив U_k состоит из нескольких циклов испытаний:

$$U_k = \{U_{k1}(P, T_k), \dots, U_{ki}(P, T_k), \dots, U_{kn}(P, T_k)\},$$

где $U_{ki}(P, T_k) = \{u_{ki1}, u_{ki2}, \dots, u_{kij}, \dots, u_{kim}\}$ – результаты отдельного цикла испытаний; $i = 1, n$; $j = 1, m$;

u_{kij} – значение выходного сигнала датчика при давлении P_j ,

n – количество циклов испытаний при фиксированной температуре,

m – количество полученных в цикле значений выходного электрического сигнала.

Значения P в цикле возрастают от минимума ($P_1 = P_{min}$) до максимального значения P_{max} ($P_{m/2} = P_{max}$) и обратно ($P_m = P_{max}$).

Для оценки качества результатов испытаний необходимо определить, влияют или нет результаты предыдущих циклов испытаний на результаты последующие циклов, как велико это влияние, можно ли этим влиянием пренебречь.

Таким образом, в рамках ограничений сформулированной выше проблемы для оценки правильности результатов испытаний необходимо определить, влияют или нет результаты предыдущих испытаний на последующие результаты, а также насколько велико это влияние и можно ли этим влиянием пренебречь. Если результаты предыдущих испытаний влияют на последующие, то циклы испытаний не являются независимыми. Тогда метрологические параметры полученной в результате испытаний характеристики преобразования будут отличаться от заявленных и, как результат, погрешности измерений в этом случае могут быть выше заданных.

III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

При изучении подобных проблем для анализа временных рядов в финансовой и технической сферах часто используется метод нормированного размаха или R/S анализ [7, 8, 9, 10]. Вычисление показателя Херста H позволяет провести классификацию временного ряда.

Можно определить ряд как персистентный, антиперсистентный или случайный [7, 8, 11]. Если $H > 0,5$, то анализируемый временной ряд является персистентным и обладает долговременной памятью. Чем ближе показатель Херста к 1, тем больше эффект памяти и, следовательно, последующие значения ряда в значительной степени определяются предыдущими

«историческими» значениями. Если $H \sim 0,5$, то ряд представляет собой белый шум. При $H < 0,5$ ряд является антиперсистентным и обладает выраженными фрактальными свойствами.

Хёрстом было определено экспериментальное соотношение для нормированного размаха, которое характерно для многих временных рядов [7, 8, 12, 13]:

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

где a – некоторая константа, которая обычно принимается равной 0.5 [13],

τ – текущее значение длины выборки,

H – показатель Хёрста,

R/S – нормированный размах.

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

$$R(\tau) = \max_t X(t, \tau) - \min_t X(t, \tau), \quad t = \overline{1, \tau},$$

где $\tau = \overline{3, T}$;

T – длина всей выборки.

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

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (x(i) - \bar{x}(\tau)),$$

где $\bar{x}(\tau) = \frac{1}{\tau} \cdot \sum_{i=1}^{\tau} x(i)$.

Стандартное отклонение данных $S(\tau)$ предназначено для сравнения различных типов временных рядов:

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

Из соотношения (1) следует:

$$H(\tau) = \frac{\log(R/S)}{\log(a \cdot \tau)}. \quad (1)$$

Далее строится график зависимости значения $\log(R/S)$ от $\log(a\tau)$. Полученные точки аппроксимируются, например, с помощью метода наименьших квадратов.

Оценка показателя Хёрста H реализуется с помощью определения угла наклона полученной прямой [14, 15, 16, 17].

Имеющиеся данные результатов испытаний не являются временным рядом. Тем не менее, для оценки

качества результатов испытаний и возможности их применения для формирования градуировочной характеристики предлагается использовать метод нормированного размаха. Но для корректного использования необходимо провести предварительную обработку данных.

Исходные данные представляют собой значения выходного электрического сигнала, снимаемого из 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.

Зависимость выходного сигнала канала давления от давления, подаваемого на вход датчика, построенная по результатам испытаний, представлена на рис. 1. На графике представлены первая часть одного цикла испытаний для конкретного значения температуры (увеличение давления с постоянным шагом 0,06 МПа и соответствующий рост значения выходного сигнала).

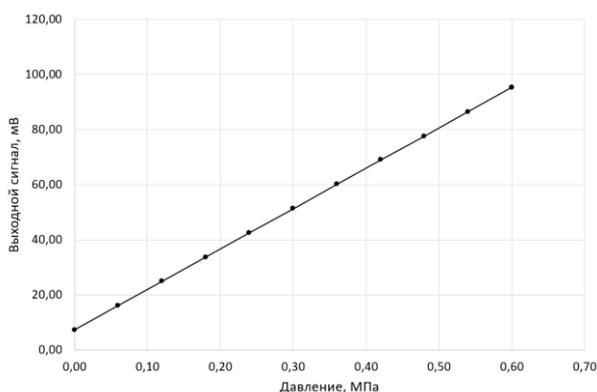


Рис. 1. Ряд, построенный на основе результатов испытаний датчика давления

Преобразуем этот график. Вычитая из текущих значений выходного сигнала канала давления среднеквадратичное значение исходного ряда, получим ряд, в котором значения сигнала симметричны относительно оси абсцисс. Для такого ряда график зависимости значения $\log(R/S)$ от $\log(at)$ позволяет определить показатель H как среднее значение тангенса угла наклона графика (рис. 2).

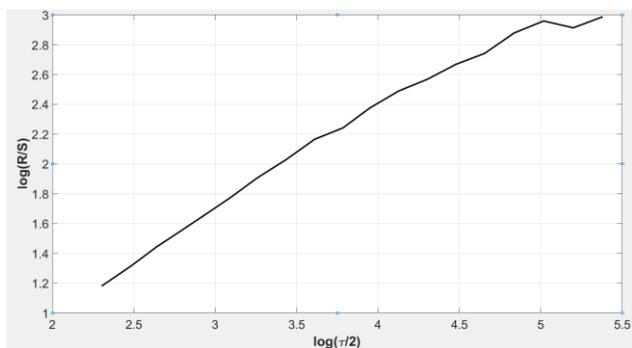


Рис. 2. Пример зависимости для оценки показателя Херста

IV. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА

Для корректного определения показателя Херста необходимо использовать достаточно большую выборку ряда [8, 11, 13, 17, 18, 19]. Поведение показателя Херста в зависимости от величины выборки, представленное на рис. 3, показывает, что при малом количестве значений ряда показатель Херста ведет себя нестабильно.

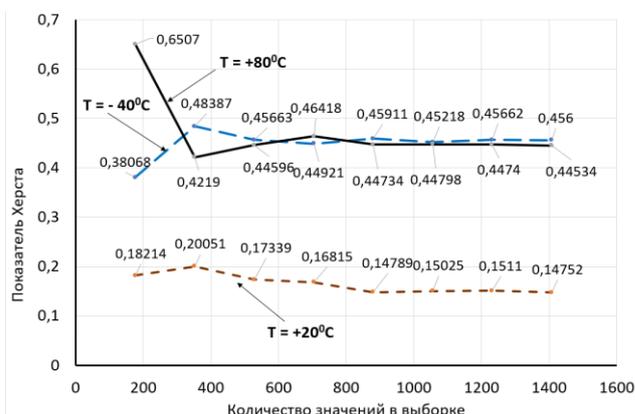


Рис. 3. Изменение показателя Херста в зависимости от размера выборки ряда для различных температур

Рост величины выборки ряда приводит к стабилизации значений показателя. Его колебания незначительны, отклонения от среднего значения не превышают 1,1%.

Для рассматриваемой задачи оптимальная величина ряда составляет величину 900÷1000 значений. Следует отметить, что это значение будет другим для ряда другого параметра.

Используя выражение (1), рассчитаем показатель Херста для рядов результатов испытаний, полученных при различных температурах окружающей среды. Вычисления будем проводить с учетом оценки величины выборки ряда. На рис. 4 представлена зависимость показателя Херста от значений температуры.

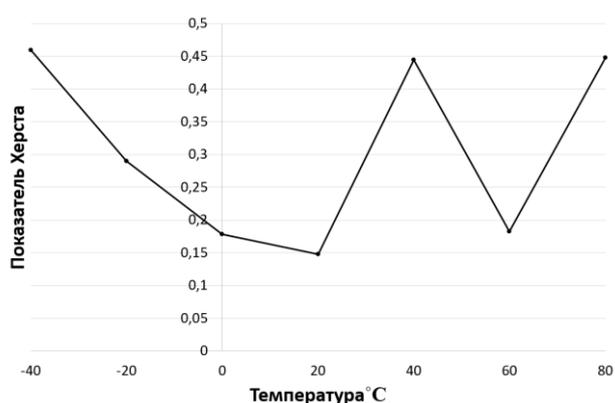


Рис. 4. Значения показателя Херста для рядов результатов испытаний, полученных при различных температурах

Поскольку каждый цикл испытаний должен быть независим от ранее проведенных, показатель Херста должен быть $H < 0,5$. В этом случае ряд обладает признаками фрактала, то есть высокой степенью повторяемости формы, и ряд не обладает памятью, поэтому последующие результаты испытаний не зависят от предыдущих.

Значения в диапазоне $H > 0,5$ определяют наличие зависимости текущих значений ряда от предыдущих. Это означает, что в результате проведения испытаний были нарушены условия получения независимости результатов, либо методика недостаточно отработана или не верна.

В данном случае показатель Херста для температур (в градусах Цельсия) $T = -20, T = 0, T = +20, T = +60$ меньше 0,3. Это означает, что ряд обладает высокой повторяемостью формы, что характерно для качественно выполненных градуировочных испытаний. Следовательно, в данном случае результаты одного отдельного цикла испытаний не зависят от другого цикла.

При температурах $T = -40, T = +40$ и $T = +80$ значения показателя находятся фактически на границе области фрактальности. Но для построения более точной характеристики преобразования испытания при данных температурах желательно повторить.

На рис. 5 представлена зависимость показателя Херста от температуры для трех типов датчиков давления.

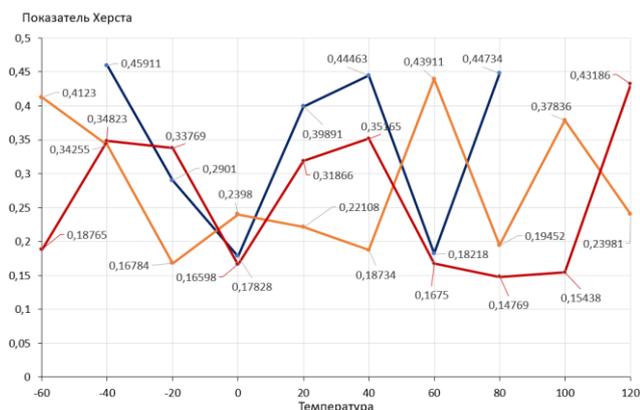


Рис. 5. Зависимость показателя Херста от температуры

Значения показателя Херста меньше 0,5 для всех выборок, полученных из результатов испытаний. Каждый из рядов является антиперсистентным. Результаты расчетов показывают, что ряд образован из элементов с повторяющейся формой. Не выявлена существенная зависимость отдельных циклов испытаний от предыдущих циклов. Результаты расчетов показывают, что использование показателя Херста для оценки фрактальности графика испытаний возможно. Однако необходимо определить, насколько чувствительным является метод.

Испытания датчиков проведены в полном соответствии со стандартами и методикой испытаний.

Первый датчик абсолютного давления тензорезисторного типа предназначен для измерения давления до 0,6 Мпа [5, 6]. Два других датчика также являются датчиками абсолютного давления с диапазонами измерения до 5,880 Мпа и 0,980 Мпа, соответственно.

Рассмотрим нарушение условий испытаний, связанное с уменьшением длительности установки новой температуры. В этом случае температурные условия предыдущих испытаний будут влиять на результаты текущих испытаний. В такой ситуации температура датчика в начале первого цикла испытаний не будет равна требуемой. Значения выходного сигнала будут искажены влиянием температуры предыдущих испытаний.

Построим искусственные ряды для отдельных эталонных циклов испытаний датчика для измерения давления до 0,6 Мпа. На рис. 6 представлены значения показателя Херста для нескольких последовательных циклов испытаний. Температура равна 40°C.

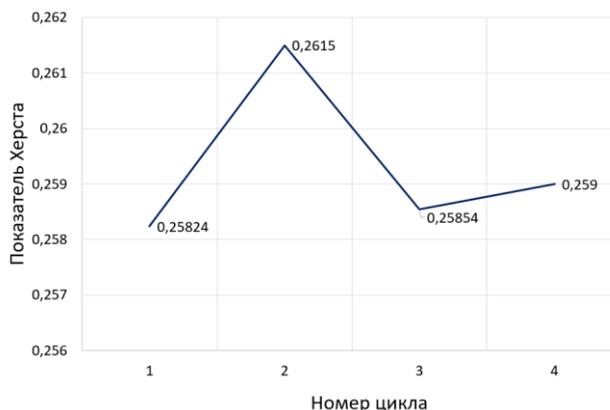


Рис. 6. Значения показателя Херста для отдельных циклов испытаний

На основе достаточно большого количества испытаний может быть определен диапазон допустимых значений H для конкретного значения температуры. Предположим, что для температуры $T = 40^\circ\text{C}$ этот диапазон равен:

$$0,255 < H < 0,264. \quad (2)$$

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:

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

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

Результаты, представленные на рис. 6, получены при значении воспроизводимости, равном 0,02%.

Абсолютная погрешность измерений выходного сигнала составила 0,02 мВ.

В случае влияния температуры предыдущего цикла на выходной сигнал датчика значение Δ_m увеличивается. Это увеличение заметно на начальном участке цикла. Компьютерное моделирование показывает, что показатель Херста не соответствует ограничениям (2) при увеличении разброса сигнала на начальном участке цикла $\Delta_m \geq 0,03$. Результаты приведены на рис. 7.

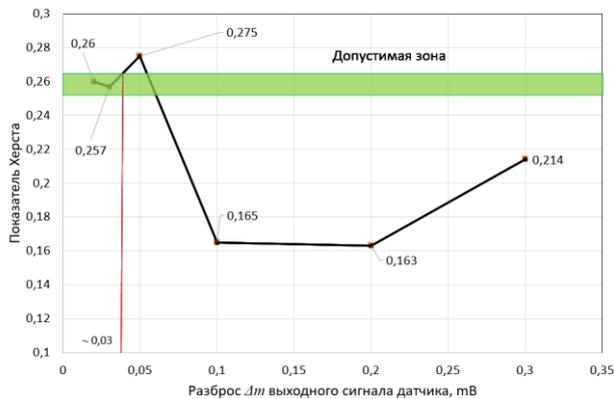


Рис. 7. Изменение показателя Херста от разброса выходного сигнала при $T=40^{\circ}\text{C}$

При больших значениях Δ_m показатель Херста может быть больше 0,5, что характеризует серьезные нарушения условий испытаний или выход датчика из строя (рис.8).

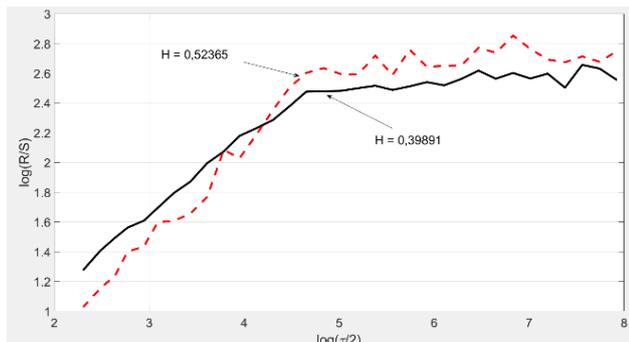


Рис. 8. Значения показателя Херста для рядов результатов испытаний, полученных при температуре $T=20^{\circ}\text{C}$

Если рассматривать ряды, построенные на основе результатов двух и более циклов испытаний, то значение показателя Херста растет, но не превышает 0,5. Это естественно, поскольку данные циклов отличаются. При этом чувствительность таких рядов к влиянию температуры на выходной сигнал на начальном этапе первого цикла снижается.

V. 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 в диапазоне $(0,0 \div 0,5)$. В этом случае ряд является антиперсистентным. Результаты испытаний в этом случае можно использовать для построения качественной градуировочной характеристики. Другое значение показателя Херста означает нарушения при проведении измерений или наличие недостатков в методике 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. Если же его величина больше 0,5, то это сигнализирует о существенном влиянии или о выходе датчика из строя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шапонич Д., Жигич А. Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера // Приборы и техника эксперимента. - 2001. - № 1. - С. 54-60.
- [2] Bluemm, C., R., Weiss, R., Weigel and D. Brenk, Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings. Bari, Italy. 2010. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5637991>. Pp: 3356 – 3361.
- [3] 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. С. 749-752.
- [4] 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, 2010. –Wuhan, China. – P. 4912 – 4915.
- [5] Клевцов С.И. Мультирассеянная пространственная аппроксимация градуировочной характеристики микропроцессорного датчика. Метрология. – М.: ФГУП «Стандартинформ». Вып.7. 2011. – С. 26-36.

- [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] 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
- [8] Сидоров С.Г., Никологорская А.В. Анализ временных рядов как метод построения прогноза потребления электроэнергии. //Вестник ИГЭУ. Вып. 3. 2010. – С.1-3.
- [9] Кузенков 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
- [10] 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.
- [11] Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. - 254с.
- [12] F. Cervantes-De la Torre, J.I. Gonz'alez-Trejo, C.A. Real-Ramirez, L.F. Hoyos-Reyes. Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena.// Journal of Physics: Conference Series, Number 475, 2013, P.1-10
- [13] H.E. Hurst, 1951, "Long-term storage of reservoirs: an experimental study," Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 116, pp. 770-799.
- [14] Kirichenko L., Chalaya L. An integrated approach to the study of fractal time series.//International Journal "Information Technologies & Knowledge". - 2014. - Volume 8. - Number 1. – Pp. 22-28
- [15] James B. Bassingthwaighte, Gary M. Raymond. Evaluation of the Dispersional Analysis Method for Fractal Time Series. // Ann Biomed Eng. 1995. V.23(4) – P. 491–505.
- [16] Roel F. Ceballos, Fe F. Largo 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 <http://www.onlinejournal.in>
- [17] Sergei Klevtsov 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). 2019. Yekaterinburg, Russia. P. 197-199.
- [18] Jerzy Wawszczak. Methods for estimating the Hurst exponent. The analysis of its value for fracture surface research.// Materials Science-Poland, Vol. 23, No. 2, 2005, p.585-591
- [19] 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

Pressure Sensor Test Evaluation Using Fractal Analysis Methods

S.I. Klevtsov

Institute of Radiotechnical Systems and Control, Southern Federal University, Taganrog, Russia,
sergkmps@mail.ru

Abstract — The measurement error of the microprocessor pressure sensor depends on the correct building of its conversion characteristics. The conversion characteristic of the sensor is formed on the basis of the results of calibration tests. During calibration tests deviations from the established procedure are possible, which can lead to inaccuracies in the conversion characteristics. To assess the quality of the conversion characteristics it is proposed to use the methods of fractal analysis. During the test data from the pressure sensor is cyclically taken for fixed values of the environmental parameters. The results of several test cycles with constant environmental parameters should be independent of each other and similar in shape. If such a relationship exists, then the test cycles are not independent. This can lead to a decrease in the metrological characteristics of the sensor, since the constructed conversion characteristic will be significantly different from the real one. The paper presents a method for assessing the quality of the results of calibration tests of a pressure sensor. The proposed method is based on the use of the normalized swing method. The assessment of the repeatability degree of test cycles form and their mutual independence is determined using the Hurst indicator. The

Hurst index for a series based on the results of several test cycles at a fixed ambient temperature should be less than 0.5. In this case the series is antipersistent. The test results in this case can be used to build a qualitative conversion characteristic. Another value of the Hurst indicator means violations during the measurement or the presence of deficiencies in the test method.

Keywords — conversion characteristic, Hurst exponent, sensor, pressure, test, time series

REFERENCES

- [1] Shaponich D., Zhigich A. Korrekciya p'ezorezistivnogo datchika davleniya s ispol'zovaniem mikrokontrollera (Correction of a Piezoresistive Pressure Sensor using a Microcontroller. Pribory i tekhnika eksperimenta.// Pribory i tekhnika eksperimenta. - 2001. - № 1. - S. 54-60.
- [2] Bluemm, C., R., Weiss, R., Weigel and D. Brenk, Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings. Bari, Italy. 2010.

- <https://ieeexplore.ieee.org/document/5637991>. Pp: 3356 – 3361.
- [3] 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. C. 749-752.
- [4] 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, 2010. –Wuhan , China. – P. 4912 – 4915.
- [5] Klevcov S.I. Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya approksimatsiya graduirovочноj harakteristiki mikroprocessornogo datchika. (Multi-dimensional approximation of the calibration characteristics of the microprocessor sensor) Metrologiya. – M.: FGUP «Standartinform». Vyp.7. 2011. – S. 26-36.
- [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] Antipov O.I., Neganov V.A. Primenenie metoda normirovannogo razmaha Hyorsta k analizu stohasticheskikh vremennyh ryadov v impul'snyh stabilizatorah napryazheniya. (Application of the Hurst normalized span method to the analysis of stochastic time series in pulsed voltage stabilizers) //Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. – 2009. – T.12. - №3. – S. 78-85
- [8] Sidorov S.G., Nikologorskaya A.V. Analiz vremennyh ryadov kak metod postroeniya prognoza potrebleniya elektroenergii. (Time series analysis as a method for constructing a forecast of electricity consumption) //Vestnik IGEU. Vyp. 3. 2010. – S.1-3.
- [9] Kuzenkov N. P., Loginov V. M. Ispol'zovanie metoda normirovannogo razmaha pri analize rechevyh patologij nevrologicheskogo geneza. (Using the method of normalized scope in the analysis of speech pathologies of neurological origin.) //КОМП'ЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ. - 2014. - T. 6. - № 5 - S. 775–791
- [10] 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.
- [11] Feder E. Fraktaly (Fractals): Per. s angl. – M.: Mir, 1991. - 254s.
- [12] F. Cervantes-De la Torre, J.I. Gonz'alez-Trejo, C.A. Real-Ramirez, L.F. Hoyos-Reyes. Fractal dimension algorithms and their application to time series associated with natural phenomena.// Journal of Physics: Conference Series, Number 475, 2013, P.1-10
- [13] H.E. Hurst, 1951, “Long-term storage of reservoirs: an experimental study,” Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 116, pp. 770-799.
- [14] Kirichenko L., Chalaya L. An integrated approach to the study of fractal time series.//International Journal "Information Technologies & Knowledge". - 2014. - Volume 8. - Number 1. – Pp. 22-28
- [15] James B. Bassingthwaighte, Gary M. Raymond. Evaluation of the Dispersional Analysis Method for Fractal Time Series. // Ann Biomed Eng. 1995. V.23(4) – P. 491–505.
- [16] Roel F. Ceballos, Fe F. Largo 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 <http://www.onlinejournal.in>
- [17] Sergei Klevtsov 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). 2019. Yekaterinburg, Russia. P. 197-199.
- [18] Jerzy Wawszczak. Methods for estimating the Hurst exponent. The analysis of its value for fracture surface research.// Materials Science-Poland, Vol. 23, No. 2, 2005, p.585-591
- [19] 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