

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

С. И. КЛЕВЦОВ

Федеральное автономное государственное учреждение высшего образования  
«Южный федеральный университет» (ЮФУ),  
(г. Таганрог, Российская Федерация)

E-mail: siklevcov@sfnu.ru

**Аннотация.** Для оценки качества результатов испытаний датчика давления предложено использовать метод нормированного размаха. На основе результаты нескольких циклов испытаний, полученных при фиксированной температуре окружающей среды, формируется ряд, подобный временному ряду. После дополнительной обработки для полученного ряда определяется показатель Херста. Значение показателя Херста определяет возможность использования результатов испытаний для формирования характеристики преобразования датчика.

**Abstract.** To evaluate the quality of the pressure sensor test results, it is proposed to use the normalized spread method. Based on the results of several test cycles obtained at a fixed ambient temperature, a series similar to a time series is formed. After additional processing, the Hurst index is determined for the obtained series. The value of the Hurst index determines the possibility of using the test results to form the transformation characteristic of the sensor.

### Введение

Качество характеристики преобразования определяет точность измерений, проводимых с помощью микропроцессорного датчика давления [1]. Эта характеристика формируется на основе результатов специальных градуировочных испытаний, которые проводятся по утвержденной программе и методике испытаний. Если в процессе испытаний будут зафиксированы даже незначительные отклонения от методики, они могут привести к снижению качества характеристики преобразования. При этом ухудшаются метрологические характеристики датчика, в частности, увеличивается погрешность измерений.

Для микропроцессорных датчиков актуально построение пространственных характеристик преобразования, в которых наряду с измеряемым фактором важное значение играет основной дестабилизирующий фактор [1]. Для датчиков давления это температура. Характеристика преобразования датчика в этом случае представляет собой функцию, определяющую измеряемое давление на объекте в зависимости от значений электрических сигналов, поступающих с канала температуры и канала давления датчика [3, 4].

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 с канала давления и температуры. Иногда, вместо съема сигнала с 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 преобразования и в дальнейшем приведет к искажению показаний датчика.

Таким образом, в рамках ограничений сформулированной выше проблемы для оценки качества 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 полученная в результате испытаний характеристика преобразования датчика не

будет в достаточной степени повторять реальную характеристику. Погрешности измерений в этом случае могут быть выше заданных.

### Модель оценки

Для оценки качества результатов испытаний датчика давления предложено использовать показатель Херста, который используется в методе нормированного размаха или R/S анализе [5, 6]. Вычисление показателя Херста  $H$  позволяет провести классификацию временного ряда. Если  $H \sim 0,3 \pm 0,1$ , то ряд является антиперсистентным и обладает выраженными фрактальными свойствами [7, 8]. В этом случае можно говорить о независимости отдельных циклов испытаний. Если  $H \sim 0,5 \pm 0,1$ , то ряд представляет собой белый шум. Если  $H > 0,6$ , то анализируемый временной ряд является персистентным, обладает долговременной памятью, циклы испытаний зависят друг от друга и можно предполагать, что испытания проведены некорректно.

Определено экспериментальное соотношение для нормированного размаха, которое характерно для многих временных рядов [7, 8, 9, 10]:

$$R / S = (a \cdot \tau)^H, \tag{1}$$

где  $a$  – некоторая константа, обычно принимается равной 0.5 [8, 9, 11],  $\tau$  – 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:

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

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:

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

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:

$$H(\tau) = \frac{\log(R/S)}{\log(a \cdot \tau)}. \tag{2}$$

Для оценки показателя Хёрста  $H$  необходимо определения угла наклона прямой, которая аппроксимирует зависимость значений  $\log(R/S)$  от  $\log(a\tau)$ . Можно использовать метод наименьших квадратов.

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. Пример исходных данных для одного значения температуры приведен в табл. 1.

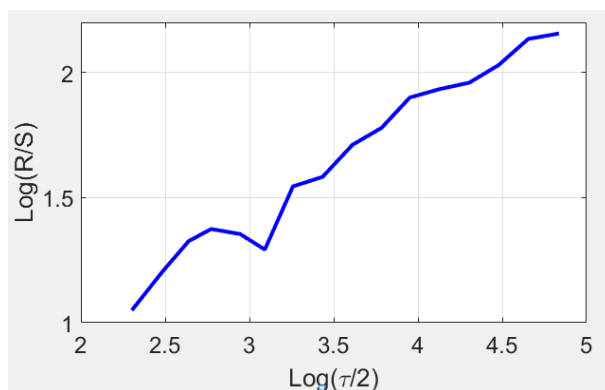
**Таблица 1.** Результаты испытаний датчика давления

Давление, подаваемое на датчик, МПа	Выходной электрический сигнал, mV				
	T = + 80 °C				
	1 цикл		...	4 цикл	
	вверх	вниз		вверх	вниз
9	7,30	7,30		7,30	7,31
0,060	16,09	16,09		16,10	16,11
0,120	24,88	24,89		24,89	24,90
0,180	33,68	33,69		33,68	33,69
0,240	42,48	42,49		42,48	42,49
0,300	51,29	51,29		51,31	51,31
0,360	60,10	60,11		60,10	60,11
0,420	68,91	68,92		68,91	68,92
0,480	77,73	77,74		77,74	77,75
0,540	86,54	86,55		86,54	86,55
0,600	95,36	95,36		95,37	95,37

Исходные данные результатов испытаний не являются временным рядом. Однако, после предварительной обработки, на основе данных результатов испытаний можно построить ряд значений, параметры которого формально будут соответствовать временному ряду. Для этого разместим циклы испытаний для фиксированной температуры один за другим в порядке фиксации при испытаниях в системе координат, где по оси абсцисс - давление, подаваемое на датчик, а по оси ординат - выходной электрический сигнал. Значения выходного сигнала в этом случае будут располагаться с постоянным шагом 0,06 Мпа.

Вычитая из текущих значений выходного сигнала канала давления среднее квадратичное значение исходного ряда, получим ряд, в котором значения сигнала симметричны относительно оси абсцисс.

Для такого ряда график зависимости значения  $\log(R/S)$  от  $\log(\tau/2)$  позволяет определить показатель  $H$ , как среднее значение тангенса угла наклона графика (рисунок 1).



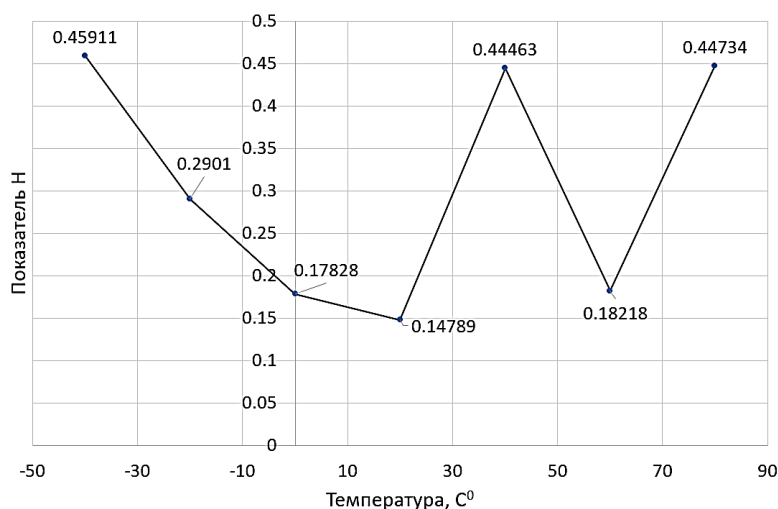
**Рис.1.** Пример зависимости для оценки показателя Херста

### Анализ результатов испытаний с использованием показателя Херста

На первом этапе оценим размеры минимально необходимой выборки ряда для оценки показателя Херста в рассматриваемом случае.

Поведение показателя Херста в зависимости от величины выборки показывает, что при малом количестве значений ряда показатель Херста ведет себя нестабильно [8, 11, 12]. По мере роста величины выборки ряда фиксируется стабилизация значений показателя. Его колебания незначительны, отклонения от среднего значения не превышает 1,1%. Для рассматриваемой задачи оптимальная величина ряда составила величину  $\sim 900-1000$  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 рисунке 2 представлена зависимость показателя Херста от значений температуры.



**Рис.2.** 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  $H \sim 0,3 \pm 0,1$ . 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  $H > 0,6$  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)  $T = -20, T = 0, T = +20, T = +60$  имеют показатель Херста 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 целесообразно повторить.

### **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 характеристика преобразования будет значительно отличаться от реальной.

Предлагаемый способ основан на использовании метода нормированного размаха. Если показатель Херста, вычисленный для сформированного из результатов испытаний ряда, находится в диапазоне  $H \sim 0,3 \pm 0,1$ , то ряд является антиперсистентным. Результаты испытаний в этом случае можно использовать для построения качественной характеристики преобразования. Другое значение показателя Херста означает нарушения при проведении измерений или наличие недостатков методики испытаний.

### **Список использованных источников**

1. Saponitch, D. and Jigitch A. Correction of a Piezoresistive Pressure Sensor using a Microcontroller. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2001. No. 1. - Pp. 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. "Multi-dimensional approximation of the calibration characteristics of the microprocessor sensor". *Metrology*. - M.: Federal State Unitary Enterprise "Standartinform". vol.7. 2011. - Pp. 26-36
4. 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>.
5. 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.
6. Сидоров С.Г., Никологорская А.В. Анализ временных рядов как метод построения прогноза потребления электроэнергии. //Вестник ИГЭУ, 2010, Вып. 3. – С.1-3.
7. 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.
8. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. - 254с.
9. 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, Number 475. - Pp.1-10.
10. Кириченко Л., Чалая Л. Комплексный подход к исследованию фрактальных временных рядов. //International Journal "Information Technologies & Knowledge", 2014, Volume 8, Number 1. – С. 22-28.
11. Bassingthwaite James B, Raymond Gary M. Evaluation of the Dispersional Analysis Method for Fractal Time Series. // Ann Biomed Eng, 1995, V.23(4). – Pp. 491–505.
12. Ceballos Roel F., Largo Fe F. 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.