

Сравнение генетического алгоритма и метода наименьших квадратов для определения калибровочной функции дифференциального датчика давления

У. Гаджизаде

Университет Халидж, Стамбул, Турция, e-mail: ulviyehacizade@halic.edu.tr

Определена калибровочная функция дифференциального датчика давления, полученная с применением генетического алгоритма. Калибровка выполнена с использованием эталонных сигналов прецизионного прибора. Осуществлено сравнение генетического алгоритма и метода наименьших квадратов для построения калибровочной функции дифференциального датчика давления. В качестве калибровочной характеристики использован полином 2-го порядка.

Ключевые слова: калибровка, дифференциальный датчик давления, генетический алгоритм, метод наименьших квадратов, неопределённость измерения.

Основная проблема инженерных приложений – достижение высокой точности и низкой неопределённости результатов измерений. Одним из способов уменьшения неопределённости измерений является калибровка измерительного прибора, осуществляемая с помощью высокоточного (эталонного) прибора. Эталонные сигналы высокоточного прибора через некоторые заданные интервалы измерения поступают на вход калибруемого измерительного прибора, по значениям выходных сигналов которого определяется калибровочная характеристика прибора в виде диаграммы или графика. Таким образом, при калибровке производится сравнение показаний (значений калибровочной характеристики) эталонного и калибруемого приборов. Калибровку какого-либо датчика обычно рассматривают как задачу идентификации математической модели (калибровочной характеристики) по экспериментальным данным. Для решения этой задачи применяют статистические методы обработки данных. Широко распространён метод наименьших квадратов (МНК), позволяющий с высокой точностью оценить коэффициенты калибровочных характеристик [1, 2]. Однако использование этого метода существенно ограничено [3]. Прежде всего, при построении зависимости (калибровочной характеристики) $y(x)$ значения аргументов $x(k)$, $k = 1, \dots, n$, могут быть известны с погрешностями. В таком случае применение МНК обычно приводит к смещённым результатам.

Рассмотрим построение калибровочной характеристики дифференциального датчика давления марки P15RVA1/10B по эталонным сигналам высокоточного прибора с использованием бинарного генетического алгоритма. Достоинства генетического алгоритма: необходима только информация об оптимизируемой функции; можно применять в случае большого, прерывистого и сложного пространства решений.

Постановка задачи. Калибровочная характеристика измерительного прибора адекватно описывается полиномом порядка l :

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_lx^l = \sum_{j=0}^l a_jx^j. \quad (1)$$

Уравнение измерений имеет вид

$$Z(k) = a_0 + a_1x(k) + a_2x^2(k) + \dots + a_lx^l(k) + v(k), \quad k = 1, \dots, n,$$

где $v(k)$ – случайные гауссовы погрешности измерения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 .

Значения аргументов $x(k)$, $k = 1, \dots, n$, воспроизводятся эталонными приборами входных воздействий. Коэффициенты полиномиальной модели (1) являются неизвестными. Сравним применение методов генетического алгоритма и МНК для получения калибровочной характеристики (1) указанного датчика.

Идентификация модели методом генетического алгоритма. В качестве калибровочной характеристики дифференциального датчика давления рассмотрим полином 2-го порядка

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (2)$$

Определяемыми параметрами являются коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 полинома (2). Для этого необходимо осуществить следующие шаги.

Шаг 1. Найти параметры генетического алгоритма: количество P_x хромосом в популяции; количество m генов в каждой хромосоме данной популяции; вероятность P_c скрещивания; вероятность P_m мутации.

Шаг 2. Создать первоначальную популяцию. Каждая хромосома в популяции содержит закодированные значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 . Хромосомы в популяции создаются случайным образом, каждая хромосома содержит m генов (битов). С учётом

формулы $m = \sum_{i=0}^2 m_i$ для кодирования значения коэффициента

a_0 требуется m_0 битов, для a_1, a_2 – соответственно m_1 и m_2 битов.

Шаг 3. Декодировать каждую хромосому популяции по формуле

$$X_i = a_i + \text{decimal}(10001\dots001)_2 (b_i - a_i) / (2^{m_i} - 1), \quad (3)$$

где X_i – декодированное значение i -го коэффициента, $i = \overline{0, 2}$; a_i, b_i – нижняя и верхняя границы отрезка $[a_i, b_i]$; $X_i \in [a_i, b_i]$.

Каждая хромосома состоит из последовательно расположенных трёх групп битов. Каждая группа по формуле (3) преобразуется в определённое десятичное число. Этот процесс называется декодированием.

Абсолютные и относительные погрешности калибровки датчика давления с применением генетического алгоритма и МНК

$Y_{ГА}, В$	$\Delta_{ГА}, Па$	$\delta_{ГА}, \%$	$Y_{МНК}, В$	$\Delta_{МНК}, Па$	$\delta_{МНК}, \%$
-0,029325510	2930	∞	-0,00005	5	∞
0,4237536425	7620	15,24	0,51190	-1190	-2,38
0,8826979000	11730	11,73	1,02390	-2390	-2,39
1,3475072625	15250	10,17	1,53620	-3620	-2,41
1,8181817300	18180	9,09	2,04880	-4880	-2,44
2,2947213025	20530	8,21	2,56150	-6150	-2,46
2,7771259800	22290	7,43	3,07440	-7440	-2,48
3,2653957625	23460	6,70	3,58750	-8750	-2,50
3,7595306500	24050	6,10	4,10080	-10080	-2,52
4,2595306425	24050	5,34	4,61430	-11430	-2,54
4,7653957400	23460	4,69	5,12800	-12800	-2,56
5,2771259425	22290	4,05	5,64190	-14190	-2,58
5,7947212500	20530	3,42	6,15600	-15600	-2,60
6,3181816625	18180	2,80	6,67030	-17030	-2,62
6,8475071800	15250	2,18	7,18480	-18480	-2,64
7,3826978025	11730	1,56	7,69950	-19950	-2,66
7,9237535300	7620	0,95	8,21440	-21440	-2,68
8,4706743625	2930	0,34	8,72950	-22950	-2,70
9,0234603000	-2350	-0,26	9,24480	-24480	-2,72

Шаг 4. После нахождения значений коэффициентов для каждого входного значения X вычисляется выходное значение Y с помощью формулы калибровочного полинома (2). Среднее квадратическое отклонение (СКО) выходных значений Z , Y , полученных соответственно экспериментально и методом генетического алгоритма, определяется по формуле

$$\sum_{j=1}^n (Z_j - Y_j)^2.$$

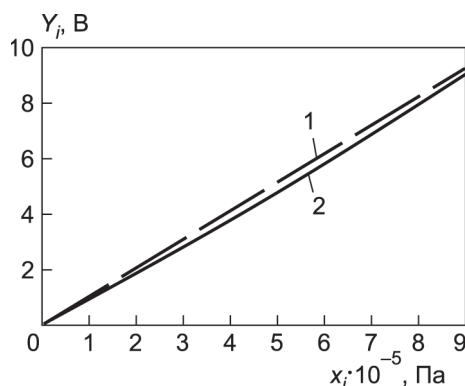


Рис. 1. Калибровочные кривые, построенные методами наименьших квадратов (1) и генетического алгоритма (2)

Цель любого генетического алгоритма – нахождение максимального решения поставленной задачи оптимизации. Для этого представим функцию годности в виде разности между СКО и числом, на много его превышающим:

$$f_r = 1500 - \sum_{j=1}^n (Z_j - Y_j)^2. \quad (4)$$

Согласно формуле (4), чем больше значение функции годности, тем больше шансов соответствующей этому значению хромосомы приблизиться к оптимальному значению [4]. Критерием окончания работы генетического алгоритма может быть достижение заданного количества итераций или заданного значения СКО. Если критерий не удовлетворяется, то совершается переход к шагу 5.

Шаг 5. С целью образования последующей популяции выполнить селекцию, которая способствует вымиранию хромосом, обладающих низкой годностью, и переходу в новую популяцию хромосом с высокой годностью. Селекцию осуществляется методом рулетки [5].

Шаг 6. Образованную популяцию подвергнуть скрещиванию. Так как скрещивание производится на основе хромосом, то количество скрещиваемых хромосом определяется по формуле $P_x \times P_c$. Отбор данного количества хромосом происходит случайным образом.

Шаг 7. Осуществить мутацию полученной популяции с целью внесения некоторого генетического разнообразия. Количество генов, которые будут подвергнуты мутации, вычисляется по формуле $P_x \times P_c \times m \times P_m$. Затем случайным образом отбираются мутирующие гены.

Шаг 8. После селекции, скрещивания и мутации получить последнюю популяцию текущей генерации. Для этой популяции необходимо определить новые значения коэффициентов калибровочной характеристики, поэтому необходимо перейти к шагу 3.

Экспериментальные результаты калибровки. Рассмотрим калибровку дифференциального датчика давления марки P15RVA1/10B для измерения динамического и статического давления жидкостей и газов с помощью поршневого манометра МП-2,5 класса 0,02. Выходной сигнал Y датчика – электрическое напряжение в вольтах, среднеквадратическая погрешность измерения давления $\sigma_f = 3000$ Па. Получены следующие экспериментальные результаты (в вольтах) калибровки датчика в диапазоне значений давления 0–900000 Па с шагом 50000 Па: 7935; 48096; 99671; 152954; 204468; 255005; 301941; 358521; 407837; 463196; 513733; 566949; 617919; 669861; 721924; 767761; 822509; 874634; 919739.

Получение калибровочной характеристики датчика давления методом генетического алгоритма [6]. Коэффициенты полинома (2) в диапазоне в виде отрезка $[-1; 2]$ рассчитаны по указанным выше экспериментальным данным и составили: $a_0 = -0,02932551$; $a_1 = 0,9002932$; $a_2 = 0,01173021$. Абсолютные $\Delta_{ГА}$ и относительные $\delta_{ГА}$ погрешности результатов $Y_{ГА}$ калибровки датчика давления методом генетического алгоритма приведены в таблице.

Относительная погрешность $\delta_{ГА}$ принимает большие значения в начале диапазона измерения (около нуля), уменьшается с увеличением измеренных значений давления и достигает минимума в конце диапазоне измерения.

Получение калибровочной характеристики датчика давления с помощью МНК. Вектор неизвестных коэффициентов $\theta = [a_0 \ a_1 \ a_2]^T$ калибровочного полинома и дисперсионную матрицу D ошибок оценок находят как [1]:

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} (X^T Z);$$

$$D(\hat{\theta}) = (X^T X)^{-1} \sigma^2,$$

где $Z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_l]^T$; $X = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_l & x_l^2 \end{pmatrix}$ –

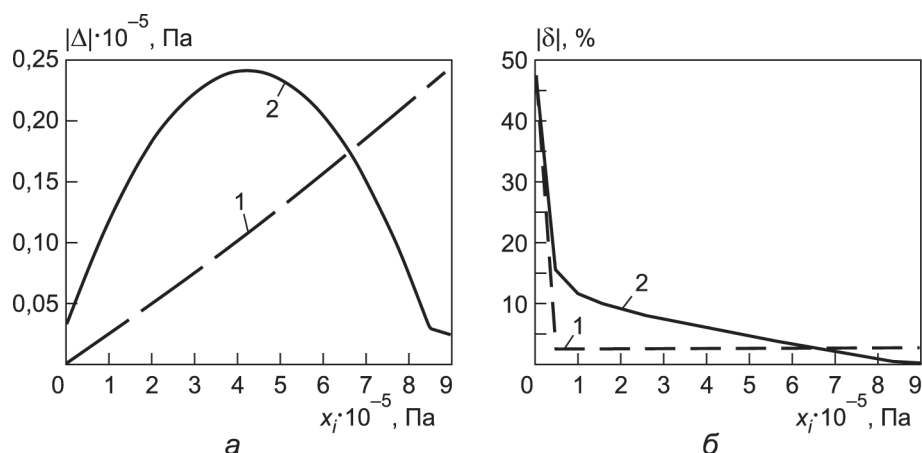


Рис. 2. Абсолютные (а) и относительные (б) погрешности результатов калибровки, полученные методами наименьших квадратов (1) и генетического алгоритма (2)

соответственно вектор измерений и матрица известных параметров.

Полученные с применением МНК коэффициенты полинома (2) составили: $a_0 = -0,00005$; $a_1 = 1,0236$; $a_2 = 0,0004$. Рассчитанные абсолютные $\Delta_{\text{МНК}}$ и относительные $\delta_{\text{МНК}}$ погрешности результатов $Y_{\text{МНК}}$ калибровки указаны в таблице. В начале диапазона измерения относительная погрешность $\delta_{\text{МНК}}$ существенно меньше значения $\delta_{\text{ГА}}$, увеличивается с увеличением измеренных значений давления и значительно превышает значение $\delta_{\text{ГА}}$ в конце диапазона.

На рис. 1, 2 представлены соответственно калибровочные характеристики, а также абсолютные и относительные погрешности результатов калибровки, полученные на основе метода генетического алгоритма и МНК. Из рис. 2 следует, что в интервале $0-6,7 \cdot 10^5$ Па предпочтительнее использовать калибровочную характеристику, построенную с применением МНК, а в интервале $6,7 \cdot 10^5-9,0 \cdot 10^5$ Па – характеристику, рассчитанную методом генетического алгоритма.

Заключение. Проанализированы калибровочные характеристики дифференциального датчика давления, построенные с использованием генетического алгоритма и МНК. Установлено, что метод генетического алгоритма предпочтительнее применять, когда пространство решений является большим, прерывным и сложным, при этом необходимо иметь информацию только об оптимизируемой функции. Однако реализация метода генетического алгоритма требует больших по сравнению с МНК временных и вы-

числительных затрат. Таким образом, в целом для нахождения калибровочной характеристики оба метода одинаково приемлемы.

Литература

1. **Абдуллаев А. А., Гаджиев Ч. М.** Алгоритмическое обеспечение информационно-измерительной системы количественного учёта нефтепродуктов // Измерительная техника. 1993. № 9. С. 16–18.
2. **Гаджиев Ч. М.** Вопросы обработки результатов измерений в информационно-измерительной системы определения массы нефтепродуктов гидростатическим методом // Измерительная техника. 1994. № 12. С. 24–26.
3. **Грановский В. А., Сирая Т. Н.** Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
4. **Papa G.** Advances in Evolutionary Algorithms Research. London, UK: Nova Sci. Pub. Inc., 2015.
5. **Jacobson L., Kanber B.** Genetic Algorithms in Java Basics. N.-York, USA: Apress, 2015.
6. **Hacizade U.** Genetic algorithm based calibration of measurement apparatus // IWW 2016: Abstracts 8th Intern. Conf. Image Processing, Wavelet and Applications, Istanbul, Turkey, 22–24 Sept., 2016. P. 50.

Дата принятия: 29.05.2018.

Comparison of GA and LSM algorithms for determining the calibration function of a differential pressure sensor

U. Hacizade

Halic University, Istanbul, Turkey, e-mail: ulviyehacizade@halic.edu.tr

One way to decrease the sensor uncertainties is to use calibration process. In this study, based on the application of the genetic algorithm (GA), using the reference signals obtained by means of a high-precision (reference) instrument, a calibration curve of the differential pressure sensor is determined. A comparison of the GA algorithm and the Least Square Method (LSM) is performed to obtain the calibration function of the differential pressure sensor. As the calibration characteristic, 2nd order polynomial is used. The obtained calibration results via GA are compared with the LSM based calibration results.

Key words: calibration, differential pressure gauge, genetic algorithm, least square method, measurement uncertainty.