

Калибровка датчиков систем диагностики автотранспорта

В. А. ЛАРИОНОВ

Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия, e-mail: larionov1953@mail.ru

Рассмотрена калибровка датчиков систем диагностики автомобилей, основанная на использовании метода взвешенного равномерного приближения обратных функций преобразования. Проведено сравнение данного метода с методом равномерного приближения на основе экспериментальных данных. Применение предложенного метода калибровки датчиков систем диагностики автотранспорта позволяет решать задачи прогнозирования остаточного ресурса узлов автомобиля без использования высокоточных датчиков.

Ключевые слова: калибровка, датчик систем диагностики, равномерное приближение функций, обратная функция преобразования, остаточный ресурс узлов.

The calibration of the measuring sensors, based on the method of the weighted uniform approximation of the inverse transform functions, is considered. This method is compared with the method of uniform approximation on the basis of experimental data. Application of the proposed method of calibration of sensors of vehicle diagnostic systems allows to solve the problem of predicting the residual life of vehicle nodes without using high-precision sensors.

Key words: calibration, sensor diagnostics systems, uniform approximation of functions, inverse transformation function, remaining resource of nodes.

Одной из задач системы диагностики автотранспорта является автоматическое прогнозирование остаточного ресурса его узлов. В системах диагностики современных автомобилей используются датчики различных физических величин: температуры, давления, уровня, расхода и др. Автоматическое прогнозирование остаточного ресурса узлов автомобиля основано на измерениях одной или нескольких физических величин через некоторые промежутки времени при одних и тех же условиях, а также определении изменений контролируемых физических величин в расчётном диапазоне. Например, номинальное давление в главной масляной магистрали двигателя ЗМЗ-4063.10 составляет 5 кгс/см² при частоте вращения 2500 мин⁻¹, а предельное давление равно 3 кгс/см² [1]. После пробега автомобиля в 165 тыс. км измерили давление масла на той же частоте вращения двигателя, оно составило 3,9 кгс/см². По уменьшению давления относительно предельного значения рассчитали ожидаемый остаточный ресурс цилиндропоршневой группы данного двигателя, равный 88 тыс. км.

Так как изменения измеряемого параметра количественно незначительны, то необходимо обеспечить высокую точность датчиков только в расчётном диапазоне. В рабочем диапазоне датчика требования по его точности значительно снижены. Таким образом, предел допускаемой погрешности датчиков может быть задан в виде трапеции: постоянный предел допускаемой погрешности в расчётном диапазоне и увеличение предела с равномерным наклоном (скоростью) вне этого диапазона.

Датчики, рассматриваемые в данной работе, можно объединить по принципу построения их функциональной схемы, приведённой на рис. 1. Измеряемая физическая величина p (например, давление) преобразуется на сенсоре в электрический сигнал (чаще всего в напряжение). Выходной код N аналого-цифрового преобразователя АЦП поступает в микроконтроллер МК. Полученная в результате вычислений

оценка N_p физической величины p поступает через аналоговый (например, токовую петлю 4—20 мА) или цифровой интерфейсы (например, RS485) в систему управления автомобилем. Если датчики не калибруют на предприятии изготовителя или же в них отсутствует встроенный микроконтроллер, то его роль выполняет бортовой компьютер.

Функция преобразования датчика имеет вид $N = f(p)$. Искомое значение p определяют из решения уравнения $p = f^{-1}(N)$. Построение математической модели датчиков основано на получении оценки обратной функции преобразования (ОФП), которую можно определить методом эталонных сигналов. На входы калибруемых датчиков поочередно подают ряд эталонных значений $p_1, p_2, \dots, p_m$. После подачи каждого сигнала проводят несколько его измерений, усреднённые результаты $N_1, N_2, \dots, N_m$ регистрируют в цифровом виде в компьютере. Необходимо найти функцию, приближающую полученные экспериментальные значения с определённой погрешностью к ОФП.

Обратная функция преобразования непрерывна на некотором известном отрезке и в соответствии с теоремой Вейерштрасса может быть приближена с определённой погрешностью полиномом

$$N_p = \sum_{i=0}^n a_i N^i, \quad (1)$$

где a_i — коэффициенты полинома.



Рис. 1. Функциональная схема измерительного датчика:

p — измеряемая физическая величина; *Сенсор p* — первичный измерительный преобразователь; N — выходной код аналого-цифрового преобразователя; МК — микроконтроллер; N_p — оценка измеряемой величины p

Для нахождения коэффициентов полинома (1) используют метод наименьших квадратов (МНК), у которого мерой погрешности приближения полинома к ОФП является среднее квадратическое значение этой погрешности [2—5]. Основные метрологические характеристики датчиков нормируются в виде предельных значений. Использование МНК, основанного на интегральном критерии, не обеспечивает нахождение полинома с минимальной максимальной погрешностью приближения. Необходимо использовать теорию равномерного приближения функций, основанную на критерии минимума максимальной погрешности приближения [6—8]. Так как предел допускаемой погрешности приближения ОФП датчиков должен иметь трапециевидную форму, то целесообразно применять взвешенное равномерное приближение. В основе этого приближения лежит условие Чебышева [9]. Чтобы полином $P(x)$ степени не выше n давал наилучшее равномерное приближение данной функции $f(x)$, «взвешенная» разность должна достигать максимума $n+2$ раза, последовательно меняя знак:

$$R(x) = w(x) [f(x) - P(x)],$$

где $w(x)$ — весовая функция.

Для нахождения функции наилучшего взвешенного равномерного приближения необходимо решить систему из $2n+4$ уравнений с $2n+4$ неизвестными L, x_i, c_j ($j = 0, 1, \dots, n$),

$$P(x) = \sum_{j=0}^n c_j x^j:$$

$$\left. \begin{aligned} R(x_i) &= (-1)^i L; \\ R'(x_i) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $i = 1, 2, \dots, n+2$.

Система (2) имеет действительное решение, но аналитически выразить его в общем случае невозможно.

Для определения оптимальной степени полинома приближения на фоне случайных сигналов необходимо использовать принцип внешнего дополнения. Данный принцип можно реализовать с помощью критериев метода группового учёта аргументов [10]. Суть этих критериев — создание внешнего дополнения методом разделения всех m экспериментальных точек векторов $\mathbf{p}(\mathbf{N})$ на две группы: A, B . Групп

па A является обучающей, а группа B — контрольной. По данным группы A находят полином приближения f_A с помощью МНК. В группе B по среднему квадратическому отклонению экспериментальных данных от полинома приближения f_A определяют степень полинома приближения, соответствующую минимуму критерия. В рассматриваемой области применения метода группового учёта аргументов наиболее эффективным с точки зрения помехоустойчивости моделирования является критерий d^2 — симметричный критерий регулярности:

$$d^2 = \left\{ \sum_A [p_A - f_B(N_A)]^2 + \sum_B [p_B - f_A(N_B)]^2 \right\} / \sum_m (p_m)^2,$$

где p_A, p_B — чётные и нечётные точки вектора $\mathbf{p}$, соответственно; f_A, f_B — полиномы приближения по МНК чётных и нечётных точек векторов $\mathbf{p}(\mathbf{N})$, соответственно; N_A, N_B — чётные и нечётные точки вектора $\mathbf{N}$, соответственно; p_m — все точки вектора $\mathbf{p}$.

Полученная степень полинома может оказаться избыточной, если погрешность приближения ОФП будет существенно меньше погрешности используемых эталонных средств. В этом случае целесообразно уменьшить степень полинома до значения, при котором погрешность приближения не превышает заданного предела. Уменьшение степени полинома позволяет снизить «эффект осцилляции» [11], уменьшить требования по точности задания старшего коэффициента полинома в микроконтроллере относительно рассчитанного значения в компьютере, уменьшить время вычисления полинома в микроконтроллере и количество эталонных сигналов, используемых при калибровке датчика.

В настоящей статье автор предлагает следующий алгоритм определения полинома взвешенного равномерного приближения ОФП, заданного векторами экспериментальных значений $\mathbf{p}(\mathbf{N})$.

1. Формирование из векторов $\mathbf{p}(\mathbf{N})$ вектора погрешности линейности $\Delta \mathbf{p}(\mathbf{N}) = \mathbf{p}(\mathbf{N}) - \mathbf{H}(\mathbf{N})$,

$$\text{где } H(N_i) = \frac{p_d - p_0}{N_d - N_0} (N_i - N_0) + p_0, \quad i = 0, 1, \dots, d.$$

2. Формирование векторов аргументов $\mathbf{X} = \{x_i\}, i = 0, 1, \dots, k$; $p_0 < p_1 < \dots < p_k; k = n+1, n$ — степень полинома приближения $g(N)$.

3. Решение системы $k+1$ линейных уравнений:

$$\sum_{j=0}^n a_j N_i^j + (-1)^j s w(N_i) = \Delta p(N_i),$$

где a_j — коэффициенты полинома приближения $g(N)$; s — переменная, соответствующая текущей максимальной погрешности приближения в диапазоне изменений N от N_1 до N_2 ; k — коэффициент наклона (скорость увеличения) допустимой погрешности приближения вне указанного диапазона изменений относительно a_j, s ;

$$w(N_i) = \begin{cases} 1+k|(N_i-N_1)| & \text{при } N_i < N_1; \\ 1 & \text{при } N_1 \leq N_i \leq N_2; \\ 1+k|(N_i-N_2)| & \text{при } N_i > N_2. \end{cases}$$

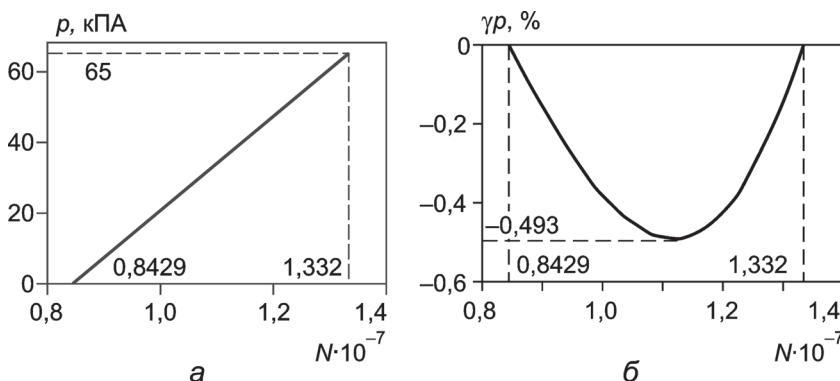


Рис. 2. Зависимость давления $p(a)$ и приведённой погрешности линейности $\gamma p(b)$ от кода N

4. Проверка условия: если $|sw(\mathbf{N})| = \max|g(\mathbf{N}) - \Delta p(\mathbf{N})|$ с допустимой погрешностью, то процесс поиска полинома наилучшего приближения закончен, в противном случае переход к шагу 4.

5. Нахождение двух значений N вектора $\mathbf{N}$, соответствующих наибольшему отклонению $|g(\mathbf{N}) - \Delta p(\mathbf{N})|$ от $|sw(\mathbf{N})|$, и замена ими близких по значению N_i в векторе $\mathbf{X}$. Переход к шагу 2.

6. Сложение $g(N)$ с $H(N)$.

Рассмотрим эффективность предложенного метода калибровки на примере экспериментальных данных датчика избыточного давления производства ЗАО «Метран» (Челябинск, Россия). На рис. 2 приведены зависимости давления p и приведённой погрешности линейности γp от кода N : $\gamma p = 100\Delta p/(p_d - p_0)$.

Необходимо найти полином взвешенного равномерного приближения ОФП датчика, обеспечивающего максимальную приведённую погрешность приближения не более 0,02 % в расчётном диапазоне изменений давления 12—31 кПа (соответственно $N = 9381693 \dots 10821446$). Наклон погрешности, т. е. скорость её увеличения вне расчётного диапазона изменения давления составляет $k = 2,5 \cdot 10^{-6}$.

Критерий d^2 достигает минимума при четвёртой степени полинома приближения ОФП: при $n = 1, 2, 3, 4$ критерий d^2 составляет 0,306; $5,244 \cdot 10^{-3}$; $3,407 \cdot 10^{-5}$; $2,185 \cdot 10^{-5}$, соответственно.

Максимальная приведённая погрешность равномерно-го приближения полиномом четвёртой степени равна 0,0012 %, что существенно меньше заданного предела. Поэтому рассмотрим возможности взвешенного равномерного приближения ОФП при второй степени полинома. По представленному выше пошаговому алгоритму определим приведённую погрешность взвешенного равномерного приближения

$$\gamma b = 100 (g - p)/(p_d - p_0).$$

Приведённую погрешность равномерного приближения γ находим по этому алгоритму при $w(N) = 1$. Максимальная погрешность взвешенного приближения $h(N) = |sw(N)|$. Результаты взвешенного равномерного и равномерного приближения ОФП приведены на рис. 3.

Полученный в результате рассмотренного выше пошагового алгоритма минимум максимальной приведённой погрешности взвешенного приближения ОФП равен 0,011 %, максимальная приведённая погрешность равномерного приближения ОФП равна 0,031 %. Таким образом, максимальная погрешность взвешенного равномерного приближения ОФП меньше максимальной погрешности равномерного приближения в 2,8 раза. Увеличение наклона погрешности k приводит к уменьшению максимальной погрешности s .

Заключение. Предложенный метод калибровки датчиков систем диагностики автотранспорта позволяет снизить требования к точности датчиков и решить задачу прогнозирования остаточного ресурса узлов автомобиля без использования высокоточных датчиков.

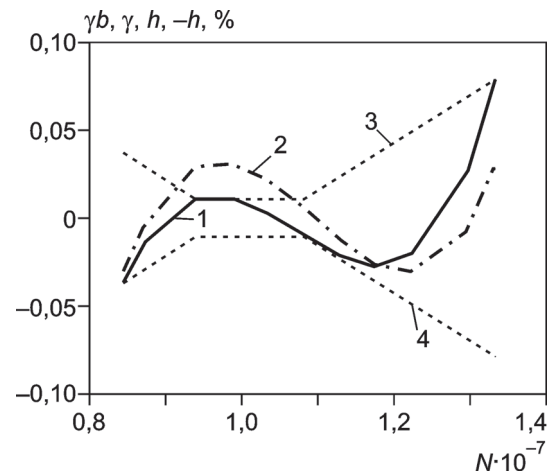


Рис. 3. Зависимости приведённых погрешностей равномерного приближения γ (2), взвешенного равномерного приближения γb обратной функции преобразования (1), максимальных приведённых погрешностей взвешенного равномерного приближения $h(3)$ и $-h(4)$ от кода N

Л и т е р а т у р а

1. Баженов Ю. В., Баженов М. Ю. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 4. С. 16—21.
2. Семёнов Л. А., Сирая Т. Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1986.
3. Recktenwald G. Pressure Transducer Calibration for M. E. Thermal Laboratory. 2004. [Электрон. ресурс]: <http://web.cecs.pdx.edu>. (дата обращения: 20.04.2016).
4. Lam S. S. Calibration of the Total and Static Pressure Transducers in the DSTO Transonic Wind Tunnel. Commonwealth of Australia. 2010. [Электрон. ресурс]: <http://catalogue.nla.gov.au/Record/4978920> (дата обращения: 20.04.2016).
5. Ilić D., Butorac J., Ferković L. Temperature measurements by means of NTC resistors and a two-parameter approximation curve // *Measurement*. 2008. V. 41. No. 3. P. 294—299.
6. Дзядык В. К. Введение в теорию равномерного приближения функций полиномами. М.: Наука, 1977.
7. Liu K. Q., Zhang M. F., Pan X. T. Non-Linear Error Analysis of the Variable Pole Pitch Capacitive Sensor // *Appl. Mechanics and Materials*. 2012. V. 220. P. 1861—1864.
8. Ларионов В. А. Концепция калибровки интеллектуальных датчиков // *Приборы и системы*. 2012. № 12. С. 46—51.
9. Гончаров В. Л. Теория интерполирования и приближения функций. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1954.
10. Ивахненко А. Г., Юрачковский Ю. П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987.
11. Ларионов В. А. Метрологическое обеспечение измерительных компонентов информационно-измерительных систем: учебное пособие. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013.

Дата принятия: 28.06.2016.