

АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ ЭТАЛОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ*

А.Г. Щипицын, А.Е. Попов

CALIBRATION ALGORITHM FOR REFERENCE PRESSURE TRANSDUCER

A.G. Shchipitsyn, A.E. Popov

В работе рассматривается усовершенствованный алгоритм калибровки эталонных измерительных преобразователей давления, основанный на итеративном приближении полиномиальной функции, аппроксимирующей выходные характеристики преобразователя в соответствии с критерием равномерности. Также рассматриваются основные свойства и этапы алгоритма, и его применение в ходе калибровки измерительных преобразователей давления.

Ключевые слова: калибровка измерительных преобразователей, метод наименьших квадратов, определение калибровочных коэффициентов, образцовый измеритель давления.

The paper discusses the improved algorithm for calibration of reference pressure transducers, which is based on iterative selection of a polynomial function that approximates the output characteristics of the converter in accordance with uniform criteria minimization. Also paper demonstrates the main features and stages of the algorithm with the results of use during the calibration of pressure modules.

Keywords: calibration of measuring transducers, the method of least squares, the calculation of calibration coefficients, the reference pressure transducer.

В последние годы наблюдается беспрецедентное повышение уровня точности приборов измерения давления. За десять лет приведенная погрешность типовых датчиков давления уменьшена с уровня 0,25 % до уровня 0,04...0,075 % от диапазона. Существует постоянная потребность в калибровке и проверке метрологических характеристик датчика. Необходимость в этом возникает вследствие того, что в условиях эксплуатации за счет влияния внешних факторов погрешность датчиков увеличивается и важно, чтобы она удовлетворяла требованиям технологического процесса. Для осуществления процедуры поверки высокоточных датчиков необходимы эталонные измерительные преобразователи давления, в несколько раз превосходящие по точности поверяемые приборы.

Для решения поставленной задачи использованы математико-алгоритмические методы, позволяющие повысить качество процедуры.

В работе [1] представлена общая теория функционирования измерительного преобразователя давления и описан способ калибровки.

1. Модель погрешности измерительного преобразователя

Применительно к эталонным преобразователям давления, используемым при поверке датчиков, был сформулирован следующий перечень требований к математической модели:

1. Модель должна наиболее полно описывать выходную характеристику преобразователя в температурном диапазоне от 15 до 35 °С. Допускается понижение степени адекватности при изменении температуры относительно нормальных климатических условий (на величину, не превышающую основной погрешности при изменении температуры на 10 °С относительно НКУ).

2. Абсолютная погрешность модели должна

* Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. Государственный контракт № П497 от 05.08.2009.

Щипицын Анатолий Георгиевич - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой систем управления ЮУрГУ; ags@susu.ac.ru

Попов Андрей Евгеньевич - аспирант кафедры систем управления ЮУрГУ; andrey.popov@emerson.com

Shchipitsyn Anatoly Georgievich - PhD, professor, head of Control systems department of SUSU; ags@susu.ac.ru

Popov Andrey Evgenievich - postgraduate student of Control systems department of SUSU; andrey.popov@emerson.com

быть минимизирована во всем рабочем диапазоне измерительного преобразователя.

3. Математическая модель не должна содержать резких отклонений от моделируемой выходной характеристики ни в одной точке, включая крайние точки температурного диапазона.

В табл. 1 представлены усредненные показатели вклада каждого из видов погрешности в суммарную приведенную погрешность измерения давления, полученные в ходе экспериментов и исходя из анализа документации на измерительные преобразователи.

Как видно из анализа таблицы, с использованием математического и алгоритмического обеспечения процедуры калибровки можно уменьшить приведенную погрешность измерительных преобразователей с 2,71 до 0,016%. Для дальнейшего повышения точности необходимо переходить к более совершенным чувствительным элементам.

Для достижения указанного предела при имеющейся элементной базе необходимо провести исследование математической модели измерительного преобразователя с тем, чтобы выявить существенные особенности выходной характеристики преобразователя и затем учесть их при проведении процедуры калибровки.

2. Недостатки существующих методов калибровки

В настоящее время наиболее часто расчет калибровочных коэффициентов измерительного преобразователя производится методом наименьших квадратов, в основе которого лежит подбор поли-

номиальной функции, аппроксимирующей выходную характеристику преобразователя путем минимизации выражения

$$Q_1 = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |f(x_k) - y_k|^2 \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Вследствие интегрального характера критерия (1) погрешность аппроксимации в отдельных точках может достигать значительной величины. Однако из-за простоты реализации этот критерий получил наибольшее распространение.

В силу того, что в метрологии принято оценивать точность преобразователя по характеристике, называемой приведенной погрешностью, возникает интерес к оптимизации по равномерному критерию (2), поскольку минимизация максимального значения погрешности приводит к минимизации приведенной погрешности прибора:

$$Q_2 = \max_{1 \leq k \leq N} \{ |f(x_k) - y_k| \}. \quad (2)$$

В разработанном алгоритме расчета калибровочных коэффициентов эталонных измерительных преобразователей предпринята попытка перехода от критерия (1) к критерию (2), поскольку потребительские свойства измерительного преобразователя обусловлены именно максимальной приведенной погрешностью.

Помимо высоких требований к точности существует особенность, отличающая эталонные преобразователи от других измерительных преобразователей, - они должны обеспечивать предельную точность при работе в лабораторных условиях. Требования к точности измерения давления при темпе-

Модель погрешности преобразователя

Таблица 1

Причина возникновения погрешности	Максимальная приведенная погрешность, % диапазона	Предел уменьшения математическими методами, % диапазона	Способ уменьшения
Нелинейность выходного сигнала чувствительного элемента	1	0	Выполнение линеаризации выходной характеристики методами регрессионного анализа
Влияние углового положения (для преобразователей абсолютного давления)	0,4	0	Усовершенствование математической модели преобразователя с целью компенсации влияния углового положения
Изменение температуры окружающего воздуха	5	0	Построение многомерной регрессионной модели, учитывающей фактор влияния температуры
Гистерезис чувствительного элемента	0,001	0,001	—
Помехи на выходе чувствительного элемента	0,01	0,005	Цифровой фильтр помех на выходе чувствительного элемента
Нестабильность	0,01	0,01	—
	6,421	0,016	

ратурах, отличных от нормальных климатических условий (НКУ), значительно менее жесткие и нормируются дополнительной погрешностью. Стандартные алгоритмы калибровки на основе метода наименьших квадратов не позволяют получить результат, удовлетворяющий данному требованию.

3. Обоснование выбора метода линеаризации выходной характеристики измерительного преобразователя

Проанализируем возможность применения различных методов линеаризации.

Точные методы линеаризации неприменимы для решения поставленной задачи в силу того, что, появляется необходимость снятия чрезмерно большого числа экспериментальных данных при калибровке измерительного преобразователя, что в ряде случаев является неосуществимым и экономически не целесообразным. Помимо этого требуется хранение большого объема экспериментальных данных в памяти микроконтроллера измерительного преобразователя, что в несколько раз превышает имеющиеся возможности встроенных запоминающих устройств.

Для применения сегментных аппроксимирующих функций необходимо разбить выходную характеристику измерительного преобразователя на линейные участки и описать уравнение каждого участка. Очевидно, что данный подход требует трудоёмких вычислений и появляется необходимость хранения большого объема калибровочной информации в памяти измерительного преобразователя. Ситуация усложняется тем, что в данном случае речь идет о двумерной выходной характеристике и сегменты должны будут представлять собой части поверхности. Вычислительные мощности микроконтроллеров, применяемых в настоящее время в измерительных преобразователях, не позволяют решить поставленную задачу.

Таким образом, аппаратные особенности современных измерительных преобразователей позволяют использовать только глобальные аппроксимирующие функции для линеаризации выходной характеристики.

В работе [4] произведен анализ применения некоторых классов функций для аппроксимации выходной характеристики. В анализе были использованы следующие типы функций:

1. Алгебраические полиномы вида

$$P(U) = a_0 + a_1U + \dots + a_nU^n,$$

где n - порядок полинома; a_i - коэффициенты полинома.

2. Дробно-рациональные функции вида

$$P(U) = \frac{a_0 + a_1U + \dots + a_mU^m}{1 + a_{m+1}U + \dots + a_nU^n},$$

где n и m - некоторые натуральные числа.

3. Функции, являющиеся решением обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{d^n P}{dU^n} = a_0 \frac{d^{n-1} P}{dU^{n-1}} + \dots + a_{n-1} P + a_n U.$$

Для каждого класса функций было рассчитано среднеквадратическое отклонение математической модели, абсолютное максимальное значение отклонений, приведенное к диапазону значения максимального значения отклонения. Помимо этого производилась оценка применимости функций с точки зрения удобства дальнейшего использования функции по количеству математических операций, входящих в состав функции.

В ходе анализа выявлено, что «оптимальный по всем выбранным нами критериям качества аппроксимирующих функций является выбор либо алгебраических полиномов 3-го порядка, либо дробно-рациональных функций 1-го порядка, так как они являются сравнимыми по сложности реализации и по точности описания» [4].

Дополнительным преимуществом алгебраических полиномов является возможность вычисления давления внутри микроконтроллера измерительного преобразователя по схеме Горнера с минимальным числом вычислительных операций.

Таким образом, применение алгебраических полиномов для аппроксимации выходной характеристики является наиболее целесообразным.

4. Особенности алгоритма калибровки

Перечислим основные особенности алгоритма.

- Перед расчетом коэффициентов измерительного преобразователя производится фильтрация экспериментальных данных с целью выделения резко выделяющихся значений. Точки, признанные выбросами, не участвуют в процедуре расчета коэффициентов.

- Порядок регрессионного полинома по температуре и давлению выбирается на этапе калибровки с учетом индивидуальных особенностей эталонного измерительного преобразователя.

- После расчета оператор может выбрать наиболее подходящий набор калибровочных коэффициентов аппроксимации из вариантов, предложенных программой. Программа предоставляет пользователю 8 математических моделей с минимальной приведенной погрешностью и представляет график абсолютной ошибки каждой модели во всем рабочем диапазоне измерительного преобразователя.

- Реализован итерационный алгоритм расчета на основе методов интервального анализа, позволяющий минимизировать абсолютную ошибку измерения.

Применительно к измерительным задачам важным дополнительным свойством измерительных преобразователей должно быть включение аппарата для оценивания погрешностей результатов измерений.

Для каждого сочетания параметров производится оценка величины невязки с использованием расширенного набора экспериментальных данных.

Результаты применения алгоритма калибровки

Измерительный преобразователь	Диапазон измерения, кПа	Макс. абсолютная ошибка при НКУ, кПа		Приведенная погрешность, %		Повышение точности, %
		Метод наименьших квадратов	Модернизированный алгоритм	Метод наименьших квадратов	Модернизированный алгоритм	
№ 2	160	0,0446	0,0267	0,0279	0,0167	40
№ 4	160	0,0139	0,0114	0,0087	0,0071	18
№ 5	160	0,0412	0,0283	0,0258	0,0177	31
№ 9	6,3	0,0004	0,0001	0,0067	0,0021	69
№ 11	6,3	0,0014	0,0004	0,0217	0,0059	73

Опишем методику оценки величины невязки.

1. После расчета коэффициентов производится вычисление абсолютной ошибки в каждой экспериментальной точке.

2. Величина абсолютной ошибки в точках, снятых при 0 и 50 градусах, делится на 2.

3. Производится исключение выбросов (слишком больших значений абсолютной ошибки), обусловленных погрешностью снятия данных. При исключении использован робастный критерий отсева резко выделяющихся значений. Использование именно робастного критерия обусловлено тем, что закон распределения абсолютной ошибки неизвестен.

4. Вычисляется максимальная величина из остаточного набора абсолютных ошибок. Эта величина является оценкой величины невязки (адекватности математической модели).

Для эффективного функционирования предложенному алгоритму на вход необходимо подавать расширенный набор экспериментальных точек. Большая часть точек используется в алгоритме расчета коэффициентов. Остальные точки применяются при оценивании степени адекватности модели. Применение данной методики обусловлено тем, простое увеличение объема экспериментальных данных не приводит к повышению степени адекватности модели в силу того, что некоторые экспериментальные точки сняты с погрешностью и не отражают свойств реальной выходной характеристики преобразователя.

Представленный алгоритм реализован в виде динамической библиотеки Coefficients_calculation.dll, написанной на языке C# платформы .Net.

После окончания расчета программа выводит на экран графики приведенной погрешности, полученные при использовании девяти наборов коэффициентов, из которых пользователь может выбрать наиболее подходящий набор исходя из специфических требований к измерительному преобразователю.

Для того чтобы измерительный преобразователь можно было откалибровать с использованием разработанного программного обеспечения, необходимо модифицировать программное обеспечение, функционирующее в микроконтроллере интеллектуального измерительного преобразователя.

Формула расчета давления по значениям ко-

дов давления и температуры должна иметь следующий вид:

$$P(t, d) = r_0 + d \cdot (r_1 + d \cdot (r_2 + d \cdot (r_3 + d \cdot (r_4 + d \cdot r_5))))),$$

где $r_0 = q_0 + t \cdot (q_1 + t \cdot (q_2 + t \cdot (q_3 + t \cdot q_4)))$;

$$r_1 = q_5 + t \cdot (q_6 + t \cdot (q_7 + t \cdot (q_8 + t \cdot q_9)))$$

$$r_2 = q_{10} + t \cdot (q_{11} + t \cdot (q_{12} + t \cdot (q_{13} + t \cdot q_{14})))$$

$$r_3 = q_{15} + t \cdot (q_{16} + t \cdot (q_{17} + t \cdot (q_{18} + t \cdot q_{19})))$$

$$r_4 = q_{20} + t \cdot (q_{21} + t \cdot (q_{22} + t \cdot (q_{23} + t \cdot q_{24})))$$

$$r_5 = q_{25} + t \cdot (q_{26} + t \cdot (q_{27} + t \cdot (q_{28} + t \cdot q_{29})))$$

d - код давления, считанный с АЦП ;

t - код температуры, считанный с АЦП ;

q - набор калибровочных коэффициентов.

В табл. 2 приводятся численные значения, характеризующие повышение точности в процентах при использовании модернизированного алгоритма по сравнению со стандартным методом наименьших квадратов.

Апробация алгоритма на исследуемых измерительных преобразователях давления показала эффективность алгоритма по сравнению со стандартными способами: повышение точности составило до 73 %. Данный результат позволит повысить класс точности выпускаемых эталонных измерительных преобразователей давления.

Литература

1. Попов, А.Е. Использование двухпараметрических математических моделей для аппроксимации функций преобразования давления / А.Е. Попов, А.В. Лазуков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». - 2008. - Вып. 7.-№3.-С. 38-40.
2. Зоркальцев, В.И. Метод наименьших квадратов / В.И. Зоркальцев. —Новосибирск: ВО «Наука», 1995. - 220 с.
3. Попов, Б.А. Приближение функций для технических приложений / Б.А. Попов, Г.С. Теслер. - Киев: Наукова Думка, 1980.
4. Исследование некоторых классов функций для аппроксимации выходной характеристики тензопреобразователей давления / Ю.Г. Свинолунов, А.А. Светлаков, В.В. Бычков, А.С. Пронин // Приборы. - 2005. -№ 9. - С. 29-41.

Поступила в редакцию 22 октября 2009 г.