

Никишин Владимир Владимирович – e-mail: nikishin_v@mail.ru; кафедра технической экспертизы и управления качеством; к.т.н.; доцент.

Eliseeva Maria Alexandrovna – Sevastopol National University; e-mail: marysia_a_a@mail.ru; 33, Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russia; phone: +78692713041; the department technical expertise and quality management; postgraduate student.

Nikishin Vladimir Vladimirovich – e-mail: nikishin_v@mail.ru; the department technical expertise and quality management; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.3.01

С.И. Клевцов, Е.В. Удод

УПРАВЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЬЮ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ В МИКРОПРОЦЕССОРНОМ ДАТЧИКЕ

Повышение точности измерений физической величины за счет схемотехнических или алгоритмических методов практически всегда приводит к увеличению стоимости датчика, часто, весьма значительному. При этом не всегда необходимость достижения высоких показателей точности технически и экономически обоснована. Для управления погрешностью измерений, в том числе достижения низких ее значений, предлагается использовать метод построения пространственной мультисегментной характеристики преобразования на основе линейных и нелинейных пространственных элементов. На основе анализа особенностей метода рассматриваются версии построения характеристики преобразования, определяющие пути оптимизации погрешности измерений. Модель пространственной характеристики преобразования, формируемая на основе ранее упомянутого метода, максимально адаптирована к особенностям конфигурации функции преобразования первичного измерительного преобразователя, фактически повторяя ее пространственную форму с учетом нелинейности, дрейфа нуля, влияния внешних факторов, включая температуру. Это обеспечивает низкую погрешность вычисления физической величины и ее адаптацию для потребностей конкретной задачи измерений. Исследование эффективности метода мультисегментной аппроксимации характеристики преобразования для управления погрешностью и повышения точности измерений физических величин проводилась на основе экспериментальных данных, полученных в процессе градуировки при различных значениях температуры термоанемометрических измерителей скорости потока жидкости. Полученные результаты показывают, что максимальная приведенная погрешность измерения скорости потока жидкости с помощью термоанемометра с использованием мультисегментной пространственной характеристики преобразования не превышает ~ 0,45 % при произвольной температуре, зафиксированной при проведении измерений. Анализ возможных путей оптимизации погрешностей измерения также проводился с использованием данных испытаний тензометрических датчиков давления. При использовании нелинейного пространственного элемента погрешность измерений датчика давления не превысила ~ 0,3 % в заданном диапазоне температур.

Управление погрешностью; термоанемометрический измеритель; датчик давления; пространственная мультисегментная характеристика преобразования.

S.I. Klevtsov, E.V. Udod

IMPROVE ACCURACY MEASUREMENT OF PHYSICAL QUANTITIES USING THE MODEL MULTI-SEGMENT SPATIAL CHARACTERISTICS CONVERSION IN SMART SENSORS

Improving the accuracy of measurements of the physical quantity due to hardware or algorithmic methods almost always leads to an increase in the cost of the sensor, often quite significant. It is not always necessary to achieve high levels of accuracy of technically and economically

justified. Existing mathematical and algorithmic methods for improving the accuracy of measurements Smart Sensors are ineffective in solving the problem of management error because it does not allow the use of different functional relationships to the approximation of arbitrary functions of individual elements of a real transformation in the space of its domain. The task of control the measurement error in the model of multi-segment space conversion characteristic is achieved through the combined use of linear and nonlinear spatial elements, as well as change the size and placement of the segments in the space conversion function definition of the primary device. To control the measurement error, including achieving low values it is proposed to use a method of constructing a multi-segment spatial conversion characteristics based on linear and nonlinear spatial elements. On the basis of analysis of the features of the method are considered version build conversion characteristic defining ways to optimize the measurement error. The model of the spatial characteristics of the transformation that is formed on the basis of the previously mentioned method, the most adapted to the characteristics of the configuration of the conversion function transducer actually repeating its spatial form based on linearity, zero drift, the effect of external factors, including temperature. It provides a low error of calculation of physical size and its adaptation to the needs of specific measurement tasks. Research of efficiency of multi-segment approximation method to control the characteristics of conversion error and improve the accuracy of measurements of physical quantities was based on experimental data obtained in the process of calibration at different temperatures hot-wire flow meter of liquid. These results indicate that the maximum percentage error measure flow rate of fluid through a multi-segment thermal anemometer using spatial characteristics to be less than ~ 0.45 % at an arbitrary temperature, fixed during measurements. Analysis of possible ways to optimize the measurement errors are also performed using test data strain gauge pressure sensors. When using non-linear spatial element of the pressure sensor measurement error does not exceed about 0.3 % in a predetermined temperature range.

Control the measurement error; thermoanemometric a measuring instrument; pressure sensor; the spatial multisegment characteristic of transformation.

Введение. Спрос на высокоточные приборы измерения медленно меняющихся физических величин растет в связи с развитием сферы услуг и промышленного производства, с развитием различных отраслей страны. Область применения датчиков физических величин достаточно широка – системы автоматического контроля, регулирования и управления сложными техническими объектами и технологическими процессами, где необходимо обеспечение непрерывного измерения различных величин [1–4]. В последние годы уделяется большое внимание производству микропроцессорных датчиков с повышенными точностными характеристиками [1, 3, 4]. Часто более точное измерение физической величины, например, давления позволяет сократить убытки при расчете газа или нефти в нефтегазовой промышленности, повысить качество продукции металлургической и химической промышленности [1, 2].

Повышение точности и достоверности определения значений физических величин представляет собой одну из важных задач совершенствования математических и алгоритмических методов обработки данных в микропроцессорных датчиках [1, 3–6]. Используемые методы и алгоритмы должны обеспечивать учет влияния различных дестабилизирующих факторов на результаты измерений, таких как, например, температура [1, 3, 4].

Достижение низкой погрешности измерения физической величины в микропроцессорном датчике базируется на использовании модели его характеристики преобразования, адаптированной к особенностям поведения функции преобразования первичного преобразователя [1, 4, 6, 7]. Для микропроцессорного датчика необходимо построить такую модель характеристики преобразования, которая бы повторяла пространственную форму реальной характеристики настолько точно, насколько это необходимо, исходя из потребностей решаемых датчиком задач.

Для обработки сигналов, поступающих с чувствительного элемента, в микропроцессорном датчике физических величин используются различные модели его характеристики преобразования, которые базируются на пространственном представлении функции преобразования первичного преобразователя [7–18].

Наиболее простой моделью характеристики датчика, широко используемой для градуировки датчика, является кусочно-линейная пространственная аппроксимация [8–12]. Сложные модели обеспечивают большую точность измерений, однако платой за это повышение является увеличение стоимости градуировки в связи с большим объемом необходимых исходных данных, что ограничивает их широкое применение [13–18].

Однако, повышение точности измерений физической величины за счет схемотехнических или алгоритмических методов практически всегда приводит к увеличению стоимости датчика, часто, весьма значительному. При этом не всегда необходимость достижения очень высоких показателей точности обоснована с технических и экономических позиций.

В связи с этим актуальна проблема управления точностью измерения физической величины в микропроцессорном датчике для достижения погрешности, определяемой текущими целями решаемой задачи.

Однако возможности управления погрешностью измерений в перечисленных выше моделях ограничены, поскольку для них характерно использование единого представления характеристики для всей области изменения полезного сигнала и внешних факторов [1, 4, 10].

Постановка задачи. В данной работе рассматривается подход к управлению погрешностью на основе использования модели пространственной мультисегментной характеристики преобразования микропроцессорного датчика, на основе которого возможно достижение заданной точности измерений, достаточной для решаемой датчиком задачи в рамках конкретной области применения.

При этом, снижается стоимость градуировки датчика, стоимость измерений и достигается погрешность измерения физической величины не выше предельно допустимой, обеспечивающая в полном объеме функции датчика в составе технического объекта.

В работе анализируются полученные результаты и даются рекомендации по использованию подхода.

Использование модели пространственной мультисегментной характеристики преобразования для управления погрешностью измерений. Для снижения и управления погрешностью определения физических величин предлагается использовать метод мультисегментной аппроксимации характеристики преобразования микропроцессорного датчика [19, 20, 21].

В рамках предлагаемого метода реальная характеристика преобразования заменяется системой локальных поверхностей так, чтобы они в совокупности повторяли ее пространственную конфигурацию. Тип аппроксимирующей локальной поверхности определяется многими факторами, такими как, например, точностные характеристики, объем и полнота исходных данных, требуемая скорость вычислений и другими.

В основе метода лежат следующие основные положения [1, 4, 20, 21]:

Модель пространственной характеристики преобразования должна быть максимально адаптирована к особенностям конфигурации функции преобразования первичного измерительного преобразователя. В этом случае характеристика фактически повторяет пространственную форму функции преобразования с учетом нелинейности, дрейфа нуля, влияния внешних факторов, например, температуры, преобразований сигналов в аналоговом интерфейсе датчика.

Пространственная аппроксимация характеристики датчика должна удовлетворять заданным требованиям, основными из которых являются достижения заданной погрешности аппроксимации во всех диапазонах измерения физической величины и изменения внешних воздействующих факторов, а также требования к

допустимому уровню сложности вычислений. Погрешность аппроксимации пространственной градуировочной характеристики может корректироваться в зависимости от решаемых датчиком задач.

Пространственная аппроксимация характеристики преобразования представляет собой систему локальных линейных и (или) нелинейных пространственных элементов, – сегментов.

Функции, описывающие пространственную форму сегментов, могут быть различными и существенно отличаться по типу, например, часть сегментов описывается линейными выражениями, а часть – нелинейными (полиномом). Тип функциональной зависимости определяется многими факторами, такими как, достижение заданной погрешности аппроксимации, объем и полнота исходных данных, требуемая скорость вычислений и другими.

Сшивка сегментов на границе раздела их областей определения не производится, что значительно снижает сложность алгоритма. Пространственная конфигурация краев сегментов на границах областей их определения должна обеспечивать достижение заданной погрешности аппроксимации характеристики преобразования при выборе любого из сегментов в процессе проведения измерений. То есть отдельные сегменты характеристики могут перекрывать друг друга без ухода погрешности за пределы заданной допустимой зоны

Исследование эффективности модели для управления погрешностью измерений. Исследование эффективности метода мультисегментной аппроксимации характеристики преобразования по снижению и управлению погрешностью измерений проводилась на основе экспериментальных данных, полученных в процессе градуировки термоанемометрических измерителей (ТА) скорости потока жидкости и датчиков давления при различных значениях температуры.

В первом случае испытания проводились для двух однотипных термоанемометрических измерителей скорости потока жидкости (№1 и №2) в диапазонах скоростей потоков (ориентировочно) от 1,46 м/с до 11,5 м/с для первого образца и от 1,79 м/с до 15,00 м/с для другого образца при 4-х значениях температуры для первого образца ($T \sim 23-25^{\circ}\text{C}$, $\sim 30^{\circ}\text{C}$, $\sim 38-39^{\circ}\text{C}$, $\sim 45-47^{\circ}\text{C}$) и 6-ти значениях температуры для второго образца ($T \sim 21-23^{\circ}\text{C}$, $\sim 25^{\circ}\text{C}$, $\sim 30-31^{\circ}\text{C}$ $\sim 35-36^{\circ}\text{C}$, $\sim 40-41^{\circ}\text{C}$, $\sim 45-47^{\circ}\text{C}$).

Использование метода мультисегментной аппроксимации характеристики преобразования на основе моделей линейных или нелинейных пространственных элементов для вычислений значений скорости потока жидкости проводилось с учетом температуры.

Представленные данные испытаний характеризуются значительной нелинейностью при задаваемой температуре, которая изменялась в небольшом диапазоне величин относительно некоторого среднего значения. Диапазон отклонений температуры (разница между верхним и нижним значениями при задаваемом значении температуры) достигали значений в 1–2°C.

Нелинейность наблюдается на всем диапазоне изменения скорости потока жидкости.

Зависимость электрического сигнала канала измерения скорости потока U_{ia} ТА от температуры также имеет нелинейный характер. При увеличении температуры для одних и тех же значениях скорости потока выходной сигнал U_{ia} уменьшается, что на графиках (рис. 1, 2) выглядит как "сползание" характеристики, то есть сдвиг в область более низких значений измеряемого электрического сигнала.

Кроме того, реальная характеристика преобразования ТА представляет вогнутую поверхность в системе параметров $V \times U_{ia} \times T$, которая имеет особенность, – это вогнутая поверхность относительно области определения $U_{ia} \times T$, границы поверхности не параллельны относительно оси OT (рис. 3).

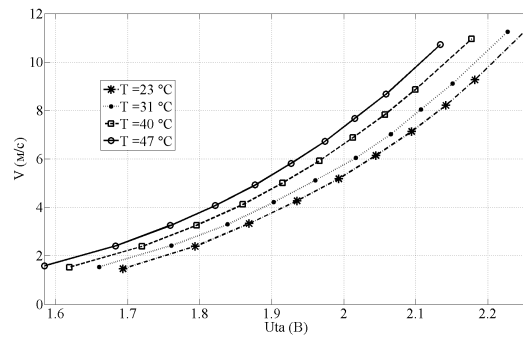


Рис. 1. Изменение сигнала ТА №1 в зависимости от скорости потока жидкости при различных температурах

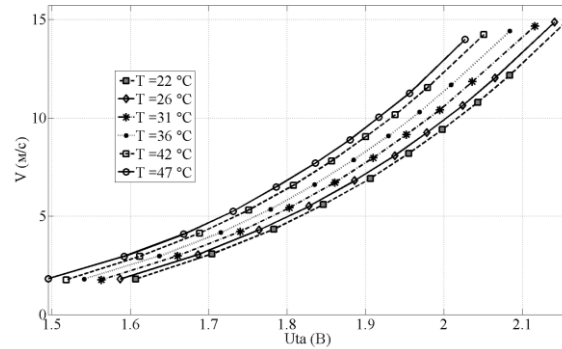


Рис. 2. Изменение сигнала ТА №2 в зависимости от скорости потока жидкости при различных температурах

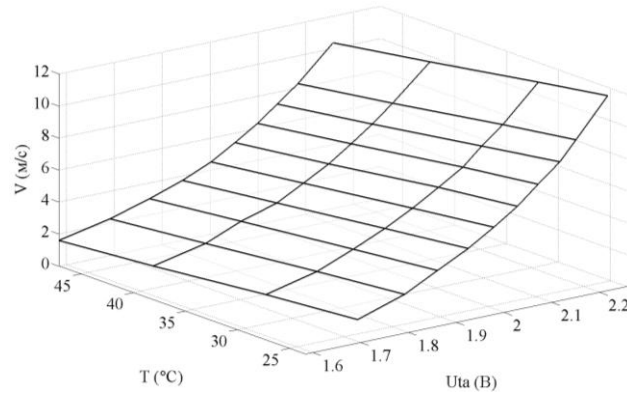


Рис. 3. Характеристика преобразования ТА №1 в пространстве $V \times U_{ta} \times T$, построенная по результатам испытаний

Пространственную мультисегментную характеристику преобразования (МСХП) для ТА формировали на основе данных испытаний следующим образом:

- ◆ по параметру U_{ta} значения выбирались для каждой задаваемой температуры из ряда значений через один, начиная со значения, соответствующего наименьшей скорости потока жидкости;

- ◆ не выбранные для построения градуировочной характеристики значения использовались для оценки точности измерений скорости потока жидкости с помощью МСХП.

Количество сегментов по оси температур $OT - 3$, по оси $OU_{ta} - 3$, т.е. всего девять сегментов.

Коэффициенты аппроксимации МСХД определяли методом наименьших квадратов для каждого сегмента с использованием экспериментальных точек, принадлежащих области определения сегмента.

На рис. 4, 5 представлены графики абсолютной величины приведенной погрешности (в процентах к диапазону измеряемой скорости движения жидкости) вычисления значений скорости движения жидкости для ТА №1 и ТА №2 с использованием нелинейных пространственных элементов МСХП при задаваемых температурах.

Следует отметить, что погрешность аппроксимации в данном случае значительно ниже 0,01 %, что позволяет не учитывать ее при измерениях.

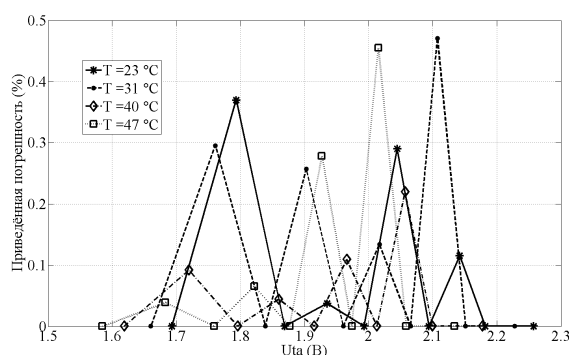


Рис. 4. Графики изменения абсолютного значения приведенной погрешности вычисления скорости потока жидкости с помощью мультисегментной характеристики преобразования ТА №1

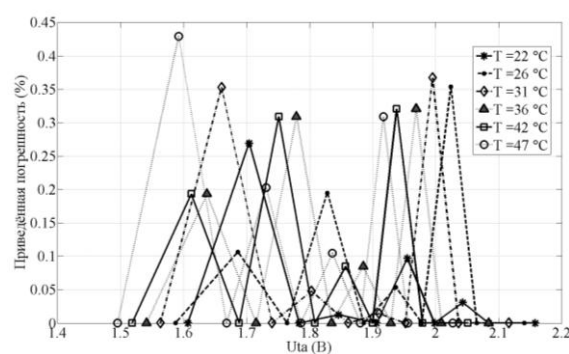


Рис. 5. Графики изменения абсолютного значения приведенной погрешности вычисления скорости потока жидкости с помощью мультисегментной характеристики преобразования ТА №2

На рис. 6, 7 представлены в пространстве параметров $V \times U_{ta} \times T$ графики абсолютной величины приведенной погрешности (в процентах к диапазону измеряемой скорости движения жидкости) вычисления значений скорости движения жидкости для ТА №1 и ТА №2 с использованием нелинейных пространственных элементов МСХП при задаваемых температурах.

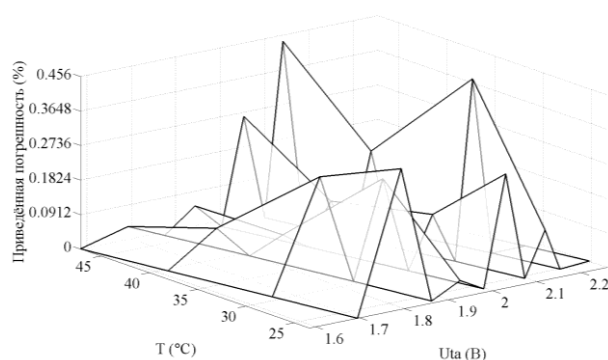


Рис. 6. График изменения абсолютного значения приведенной погрешности вычисления скорости потока жидкости с помощью мультисегментной характеристики преобразования ТА №1 в пространстве параметров $V \times U_{ta} \times T$

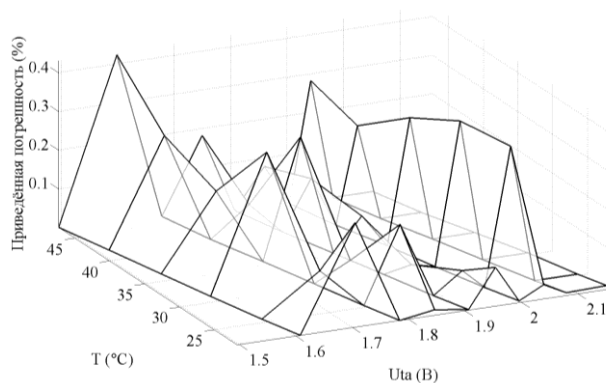


Рис. 7. График изменения абсолютного значения приведенной погрешности вычисления скорости потока жидкости с помощью мультисегментной характеристики преобразования ТА №2 в пространстве параметров $V \times U_{ta} \times T$

Таким образом, погрешность измерения скорости потока жидкости с помощью термоанемометра с использованием мультисегментной пространственной характеристики преобразования позволяет получить результат с максимальной приведенной погрешностью $\sim 0,45\%$ при произвольной температуре, зафиксированной при проведении измерений.

Оценка эффективности метода для решения задачи управления погрешностью осуществлялась на основе градуировочных испытаний датчиков давления. Учитывая особенности метода мультисегментной пространственной характеристики преобразования, можно определить способы управления погрешностью измерений контролируемой физической величины.

На точность измерения давления с помощью метода мультисегментной аппроксимации ПГХ непосредственно влияет выбор размеров пространственных элементов в области определения $P \times T$.

Для оценки влияния размеров пространственных элементов на погрешность вычисления значений давления с использованием рассматриваемых моделей воспользуемся данными градуировочных температурных испытаний чувствительного элемента тензорезисторного типа.

Испытания проводились по следующей схеме:

- ♦ температура изменялась от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление от 0 до 600 кПа с шагом 60 кПа;
- ♦ при каждом фиксированном значении температуры давление изменялось от нижнего значения до верхнего предела и обратно. Количество циклов изменений давления при заданной температуре – 4. Таким образом, фиксировался гистерезис реальной функции преобразования чувствительного элемента.

Рассмотрим влияние размеров линейных и нелинейных пространственных элементов отдельно по оси давлений и оси температур.

Для оценки влияния размеров ЛПЭ и НПЭ по давлению вычисление давления проводилось с использованием пространственной градуировочной характеристики, построенной на базе экспериментальных точек с шагом по температуре $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для двух вариантов шага по давлению, – 300 кПа и 120 кПа.

Графики максимальных значений относительных приведённых погрешностей вычислений значений давления при использовании ЛПЭ и НПЭ для различных температур для шага по давлению 120 кПа и 300 кПа, приведены соответственно на рис. 8, 9.

Из анализа рисунков следует, что уменьшение величины локального пространственного элемента по давлению в 2,5 раза привело к снижению погрешности вычислений значений давления в 1,7–1,8 раза, в результате чего максимальная погрешность определения давления при использовании ЛПЭ составила 0,12 %, а НПЭ – 0,1 %.

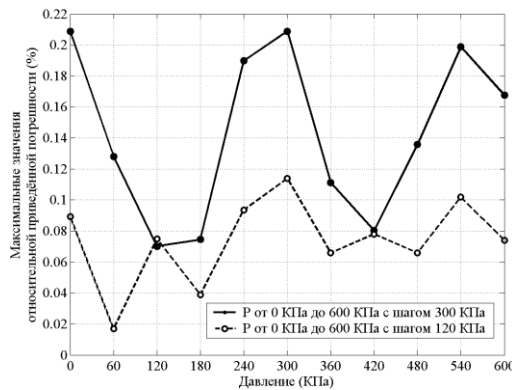


Рис. 8. Максимальные значения относительной приведённой погрешности вычислений значений давления при использовании ЛПЭ

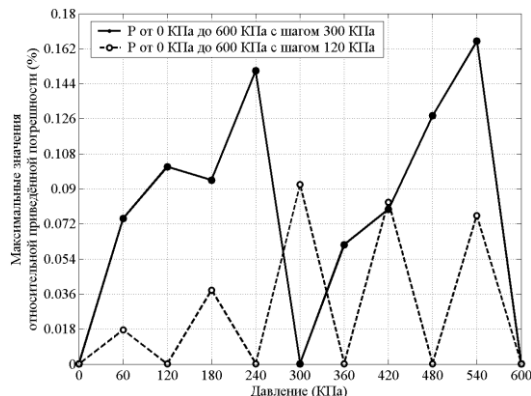


Рис. 9. Максимальные значения относительной приведённой погрешности вычислений значений давления при использовании НПЭ

Для оценки влияния размеров ЛПЭ и НПЭ по температуре вычисление давления проводилось с использованием пространственной градуировочной характеристики, построенной на базе экспериментальных точек с шагом по давлению 60 кПа для трех вариантов шага по температуре, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для оценки влияния на точность вычисления давления размеров локальных пространственных элементов по температуре приведём на рис. 10, 11 максимальные значения относительных приведённых погрешностей вычислений значений давления при использовании ЛПЭ и НПЭ соответственно.

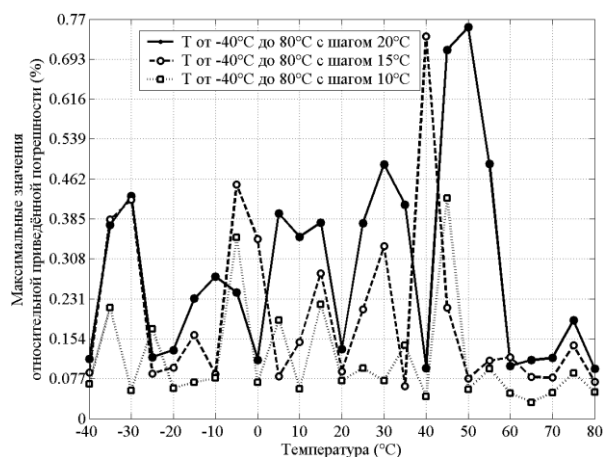


Рис. 10. Максимальные значения относительной приведенной погрешности вычислений значений давления при использовании ЛПЭ для различных температур

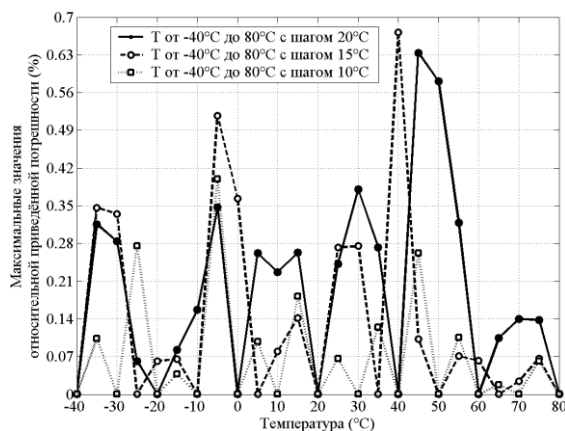


Рис. 11. Максимальные значения относительной приведенной погрешности вычислений значений давления при использовании НПЭ для различных температур

Из анализа рисунков следует, что уменьшение размера локального пространственного элемента по температуре сильно влияет на точность вычислений значений давления. Так при уменьшении размеров локальных пространственных элементов с $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, происходит снижение погрешности вычислений значений давления в 1,7–1,8 раза, при уменьшении с $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ даже при больших размерах локальных пространственных элементов по давлению приводит к снижению погрешность примерно в 4 раза.

Кроме того, результаты моделирования показывают, что уменьшение размеров пространственных элементов по температуре более существенно снижают погрешность вычислений, чем изменение размеров пространственных элементов по давлению.

Выводы. Анализ показывает, что использование модели мультисегментной пространственной характеристики преобразования позволяет достичь очень низких погрешностей измерений за счет высокой точности аппроксимации реальной функции преобразования первичного измерительного преобразователя с одновременным учетом влияния на измерения внешних и внутренних дестабилизирующих факторов во всем диапазоне их изменений.

Расчет скорости потока жидкости с помощью термоанемометра с использованием данной модели в наилучшем случае позволил получить результат с максимальной приведенной погрешностью $\sim 0,45\%$ при произвольной температуре, зафиксированной при проведении измерений [3]. Для измерения давления в наилучшем случае максимальная приведенная погрешность составляет $\sim 0,1\%$ [1, 4, 20, 21]. Подобная точность измерений трудно достижима при использовании известных моделей функций преобразования, поскольку погрешности аппроксимации только термометров в термоанемометре изменяются в диапазоне 1,8–3,1 % [3]. А, например, погрешность аппроксимации для датчика давления в случае мультисегментной модели может составлять величину в диапазоне 0,01–0,03 [1, 4, 20, 21], что позволяет не учитывать эту погрешность при расчетах.

Существующие математические и алгоритмические методы повышения точности измерений в микропроцессорных датчиках малоэффективны при решении задачи управления погрешностью, поскольку не позволяют применять различные функциональные зависимости к аппроксимации произвольных отдельных элементов реальной функции преобразования в пространстве ее области определения [7–18].

Анализ результатов моделирования показал, что задача управления погрешностью измерений в рамках модели мультисегментной пространственной характеристики преобразования решается с помощью комплексного использования линейных и нелинейных пространственных элементов, а также изменения размеров и размещения сегментов в пространстве определения функции преобразования первичного преобразователя. При этом необходимо учитывать, что погрешность вычислений значений давления с компенсацией температурного влияния на основе линейного пространственного элемента менее чувствительна к погрешности исходных данных, чем модель на основе параболического пространственного элемента, но при погрешностях менее 0,5 % точность вычислений значений давления при использовании НПЭ будет выше, чем при использовании ЛПЭ за счёт более низкой методической погрешности.

Отношение погрешности вычислений значений давления к погрешности исходных данных при одинаковых абсолютных значениях погрешности на канале давления и температуры при использовании ЛПЭ и НПЭ примерно равно 1,5–1,6. Чувствительность модели ПГХ при использовании ЛПЭ к погрешности на канале температуры ниже, чем чувствительность к погрешности на канале температуры при использовании НПЭ.

В заключении можно отметить, что использование метода мультисегментных пространственных характеристик преобразования в микропроцессорных датчиках может обеспечить не только высокую точность измерений в широком диапазоне изменения измеряемых физических величин и внешних влияющих факторов, но и эффективное управление погрешностью измерений при оптимизации затрат на калибровку. Полученные результаты могут быть полезны при создании программно-алгоритмического обеспечения микропроцессорных датчиков физических величин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Научно-технические, технологические и практические основы конструирования датчиковой аппаратуры для измерений физических величин в 5-ти т. Т. 1. Датчиковая аппаратура давлений: монография. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. – 579 с.
2. *Васильев Н.К.* Учет природного газа на объектах магистральных газопроводов. – Л.: Недра, 1990. – 128 с.
3. *Пьявченко О.Н., Зори А.А., Клевцов С.И., Кузнецов Д.Н.* Информационно-измерительные системы определения параметров газожидкостных потоков: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 244 с.
4. *Пьявченко О.Н., Клевцов С.И., Мокров Е.А., Панич А.Е., Пьявченко А.О., Удод Е.В., Федоров А.Г.* Прецизионные интеллектуальные тензометрические датчики давления. Методы, модели, алгоритмы и архитектуры / Под ред. О.Н. Пьявченко. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. – 152 с.
5. *Anton Bakker, Johan Huijsing* High-Accuracy CMOS Smart Temperature Sensors – Springer Science & Business Media, 2013 – 121 с. – URL: <https://books.google.ru/books?id=ZhjTBwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>
6. *Spiridonov E.I., Markov A.V.* Calibration productivity increase of pressure measuring devices under high accuracy requirements // The Third International Conference on Problem of PHYSICAL METROLOGY. Abstracts. Saint Petersburg, Russia 15-19 June, 1998. – P. 144.
7. *Клевцов С.И., Линьков В.С., Веретельников Ю.А., Кузьминов В.Г.* Погрешности вычисления давления в интеллектуальном датчике при матрично-полиномиальной аппроксимации его градуировочной характеристики // Известия ТРТУ. – 2004. – № 2 (37). – С. 30-48.
8. *Бобровников Н.Р., Яркин С.В., Гридин Ю.Н., Стрыгин В.Д., Чертов Е.Д.* Математическое обеспечение микропроцессорных преобразователей аналоговых пневматических сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 2. – С. 36-39.
9. *Мухатаев Н.А.* Алгоритм линеаризации и температурной компенсации характеристик преобразователей // Материалы третьей научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Т. 2. – Таганрог, ТТИ ЮФУ. – 2008. – С. 74-76.
10. *Клевцов С.И.* Модели и методы построения прецизионных градуировочных характеристик интеллектуальных датчиков давления // Известия ТРТУ. – 2007. – № 3 (75). – С. 110-118.
11. *Гутников В.С.* Тенденции развития электронных измерительных преобразователей для датчиков // Приборы и системы управления. – 1990. – № 10. – С. 32-35.
12. *Gorbunov S. F., Tsypin B.V.* Linearization of calibration characteristics of capacitance pressure sensors // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 53, No. 10. – P.1113-1117.
13. *Bluemm C., Weiss R., Weigel R., Brenk D.* Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling // Industrial Electronics (ISIE). 2010. IEEE International Symposium. 4-7 July 2010. – P. 3356-3361.
14. *Patra J.C., Chakraborty G., Meher P.K.* Neural-Network-Based Robust Linearization and Compensation Technique for Sensors Under Nonlinear Environmental Influences // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2008. – Vol. 55, Issue 5. – P.1316-1327.
15. *Bartkovjak J., Karovičová M.* Approximation by Rational Functions // Measurement Science Review. – 2001. – Vol. 1, No. 1. – P. 63-65.
16. *Hillea P., Höhlera R., Stracka H.* A Linearisation and Compensation Method for Integrated Sensors // Sensors and Actuators A: Physical. – 1994. – Vol. 44, Issue 2. – P. 95-102
17. *Попов А.Е., Лазуков А.В.* Использование двухпараметрических математических моделей для аппроксимации функций преобразования давления // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 7, № 3. – С. 38-40.
18. *Шапонич Д., Жигич А.* Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 1. – С. 54-60.
19. *Клевцов С.И., Удод Е.В.* Пространственная плоскостная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2005. – Т. 45, № 1. – С. 99-107.
20. *Клевцов С.И.* Мультиотрезочная пространственная аппроксимация градуировочной характеристики микропроцессорного датчика // Метрология. – 2011. – № 7. – С. 26-36.
21. *Клевцов С.И.* Формирование мультиотрезочной модели градуировочной характеристики интеллектуального датчика // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 11 (88). – С. 8-11.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор П.Г. Михайлов.

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

Удод Евгений Васильевич – e-mail: udodev@mail.ru; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; 81, Petrovsky, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc; associate professor.

Udod Eugene Vasilyevich – e-mail: udodev@mail.ru; cand. of eng. sc; associate professor.

УДК 519.6:004.383

М.И. Ледовской, Е.С. Синютин

АЛГОРИТМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПОРОЖДАЮЩИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФУНКЦИЙ

Рассмотрена задача создания энергоэффективного алгоритма для вычисления элементарных функций в беспроводных сенсорных системах, где энергопотребление обеспечивается за счет накопления энергии из окружающей среды. В основу алгоритма положен таблично-алгоритмический метод вычисления функций и способ определения поправки путем интегрирования порождающих уравнений, описывающих поведение функции между ближайшим табличным и заданным значением аргумента. Предложена оригинальная реализация способа интегрирования порождающих уравнений. Процесс интегрирования разворачивается по двоичным разрядам аргумента, а также используется переменный шаг, равный весу текущего разряда аргумента. На примере функций $\sin(x)$, $\cos(x)$ исследована возможность использования подходящих методов интегрирования: методов Эйлера 1-го и 2-го порядка, метода Рунге-Кутты 4-го порядка, из которых выбран метод Эйлера 2-го порядка. Получена зависимость методической погрешности алгоритма от порядка метода интегрирования и номера разряда аргумента. Определен шаг таблицы значений функций для рассмотренных методов интегрирования. Приведено сравнение предлагаемого алгоритма с методом линейной интерполяции и алгоритмом CORDIC. По сравнению с алгоритмом CORDIC число выполняемых циклов в среднем уменьшается в два раза. По сравнению с методом линейной интерполяции в несколько раз уменьшается количество табличных значений функций. Например, для функции $\cos(x)$ количество табличных значений уменьшается в 16 раз. При этом набор операций алгоритма ограничивается простыми операциями сложения (вычитания) и сдвига. Приведены результаты экспериментального анализа методической, инструментальной и полной погрешности алгоритма в системе MATLAB. В условиях ограниченной разрядности микроконтроллера и вычислений с фиксированной точкой погрешность алгоритма принимает допустимые значения, соизмеримые с погрешностью округления данных. Результаты настоящей статьи могут найти применение при разработке алгоритмического и программного обеспечения для беспроводных сенсорных модулей на базе микроконтроллеров, а также других видов встраиваемых систем с низким энергопотреблением.

Встраиваемые системы; вычисление функций; таблично-алгоритмический метод; алгоритм CORDIC; алгоритм численного интегрирования.

M.I. Ledovskoy, E.S. Sinyutin

ALGORITHM OF INTEGRATION OF THE GENERATING EQUATIONS FOR THE CALCULATION OF ELEMENTARY FUNCTIONS

In the present paper the task of creation of algorithm with low consumption of energy for a calculation of elementary functions in wireless touch systems where energy consumption is ensured at the expense of accumulation of energy from environment is considered. In an algorithm basis the tabular-algorithmic method of functions evaluation and a mode of definition of the correction is supposed by a path of integration of the generating equations describing behavior of