

УДК 621.3.088.7

О. Н. Исанбаев, Д. С. Куликов

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

O. N. Isanbaev, D. S. Kulikov

THE METHOD OF PRELIMINARY TEMPERATURE CORRECTION OF PRIMARY MEASURING CONVERTER OF SMART SENSOR OF SHIFT

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены особенности температурной коррекции с учетом влияния температуры окружающей среды на измерительные цепи датчика перемещений. Целью работы является оптимизация методики температурной коррекции для увеличения быстродействия датчика и снижения используемых ресурсов микроконтроллера. *Материалы и методы.* Применены численные методы, такие как полиномиальная аппроксимация. *Результаты.* Получена методика предварительной коррекции кода температуры, позволяющая увеличить быстродействие датчика, снизить объем используемых ресурсов и повысить точность измерений. *Выводы.* Описанная методика может быть распространена на всю процедуру температурной коррекции основной измеряемой величины.

А б с т р а к т. *Background.* The article reviews features of temperature correction depending on the influence of environment temperature upon smart sensor of movement measuring chains. The objective is optimization of temperature correction method for increasing sensor's efficiency and decreasing of applied microcontroller's resources. *Materials and methods.* The calculus of approximations such a polynomial approximation are applied. *Results.* The method of preliminary correction temperature's code is obtained. It provides to increase sensor efficiency, to decrease applied microcontroller's resources and to improve a precision of measurements. *Conclusions.* The described method can use to distribut on the whole procedure of temperature correction of basic measured value.

К л ю ч е в ы е с л о в а: температурная коррекция, полиномиальная аппроксимация, погрешность измерения, влияние температуры, измерительная цепь.

К e y w o r d s: temperature correction, polynomial approximation, measurement error, influence of the temperature, measuring chain.

При измерении неэлектрических величин в широком температурном диапазоне температура окружающей среды первичного измерительного преобразователя (ПИП) выходит за пределы рабочего диапазона электрорадиоизделий (ЭРИ), входящих в состав вторичного измерительного преобразователя (ВИП), в том числе и микроконтроллера (МК). В этом случае, как показано на рис. 1, ПИП соединяют с ВИП кабельной перемычкой (КП) такой длины, что-

бы ВИП мог находиться в зоне воздействия температур, при котором возможно нормальное функционирование ЭРИ, входящих в состав ВИП. Для осуществления температурной коррекции выходного сигнала ПИП используют информацию о температуре, воздействующей на ПИП, разместив в одном корпусе с ПИП датчик температуры ДТ1. Сигналы измерения входной величины x с датчика измеряемой величины Дх и температуры $t_{\text{п}}$ с датчика ДТ1 ПИП поступают через КП на измерительные цепи ИЦ_x и ИЦ_t соответственно, и в виде сигналов $A_{\text{п}}^x$ и $A_{\text{п}}^t$ подаются на аналоговые входы микроконтроллера, где осуществляется преобразование сигналов, их обработка и коррекция температурной погрешности средствами микропроцессора МП с последующей передачей скорректированного кода измеряемой величины $N_{\text{вых}}^x$ через цифровой интерфейс МК. При воздействии на ВИП температуры окружающей среды $t_{\text{в}}$ измерительные цепи вносят дополнительную температурную погрешность преобразования сигналов ПИП, что снижает эффективность температурной коррекции ПИП и вносит существенную погрешность при дальнейшей обработке кода аналого-цифрового преобразователя (АЦП) входной измеряемой величины $N_{\text{п}}^x$.

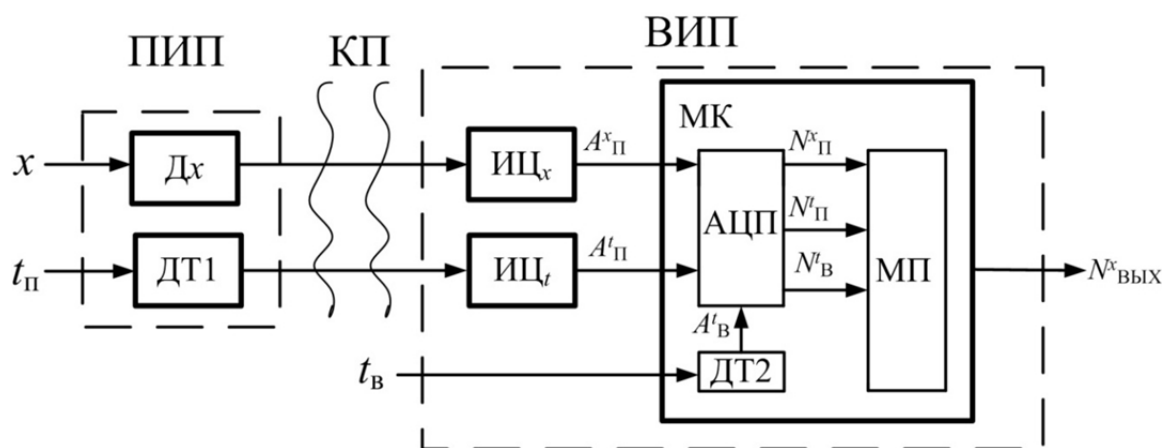


Рис. 1. Структурная схема преобразования сигналов интеллектуального датчика перемещений

Важность вопроса температурной коррекции сигнала измеряемой величины подтверждается рядом работ по данной тематике [1–6]. В работе [1] рассматривается вопрос построения измерительных цепей устройства коррекции температурной погрешности на основе анализа эквивалентной схемы замещения измерительного преобразователя. В статье [2] проблема температурной погрешности решается в основном схемотехническими методами за счет анализа измерительных цепей. Возможность применения теоретических методов анализа (импедансный метод) в вопросах коррекции температурной погрешности проверяется в [3]. В работе [4] рассматривается применение методов полиномиальной коррекции температуры, при которых производится коррекция только показаний ПИП без учета влияния температуры окружающей среды ВИП (рис. 2,а), что приводит к значительным ошибкам при дальнейших вычислениях. Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления с применением методов полиномиальной интерполяции и статистической обработки данных описывается в [5]. Рассматриваемая в [5] методика предполагает, что на ПИП и ВИП воздействует одна и та же температура. Следовательно, проведение температурной коррекции с учетом воздействующей на ВИП температуры невозможно вследствие малого количества данных, коррекция производится также без учета температуры ВИП (рис. 2,а). Для решения этой проблемы в [6] было предложено перед операцией коррекции кода измеряемой величины x провести предварительную коррекцию кода температуры $t_{\text{п}}$ с учетом температуры $t_{\text{в}}$ (рис. 2,б) методами полиномиальной аппроксимации и кусочно-линейной интерполяции. Основным недостатком предложенной методики коррекции является применение методов кусочно-линейной интерполяции, что приводит к снижению точности расчетов по описанной

методике. Следующим недостатком является необходимость хранения в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) МК большого количества коэффициентов и поиска среди них коэффициентов, соответствующих температурному диапазону, которому принадлежат измеренные температурные коды ПИП $N_{\text{П}}^t$ и ВИП $N_{\text{В}}^t$. Это приводит к уменьшению свободного пространства памяти ПЗУ, а также к снижению скорости обработки данных.

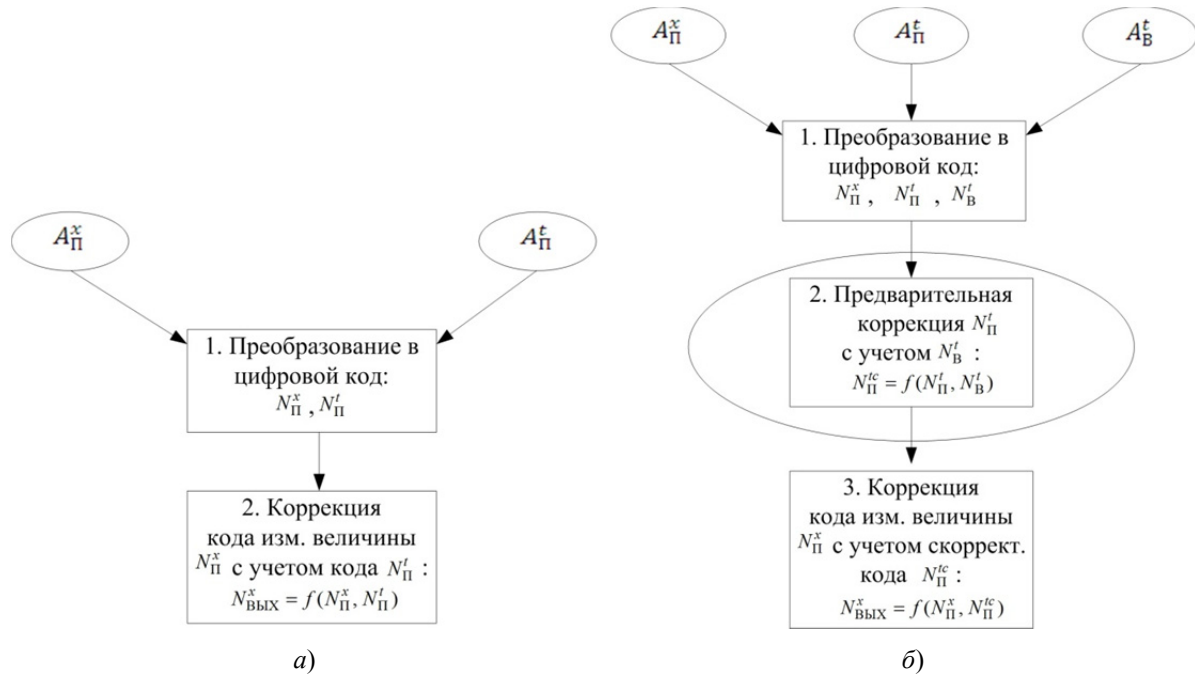
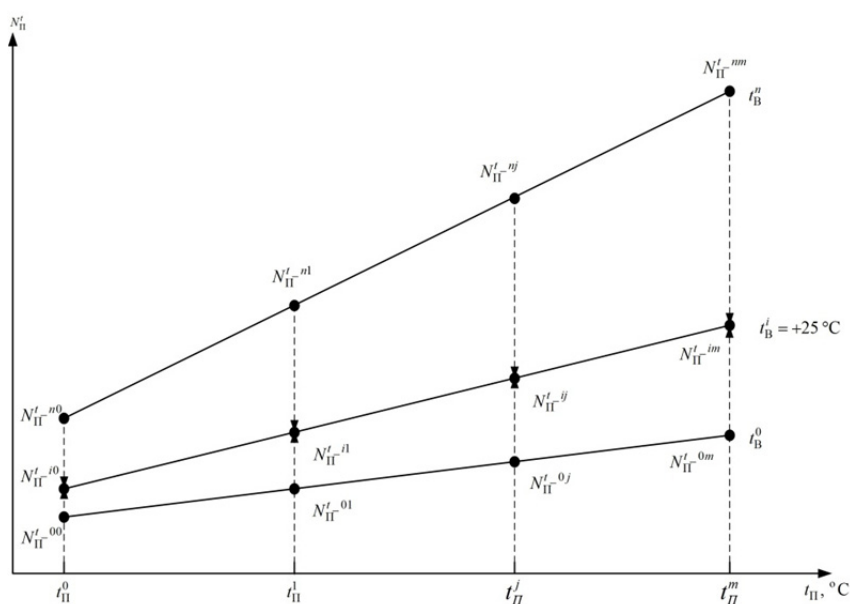


Рис. 2. Методики температурной коррекции кода измеряемой величины

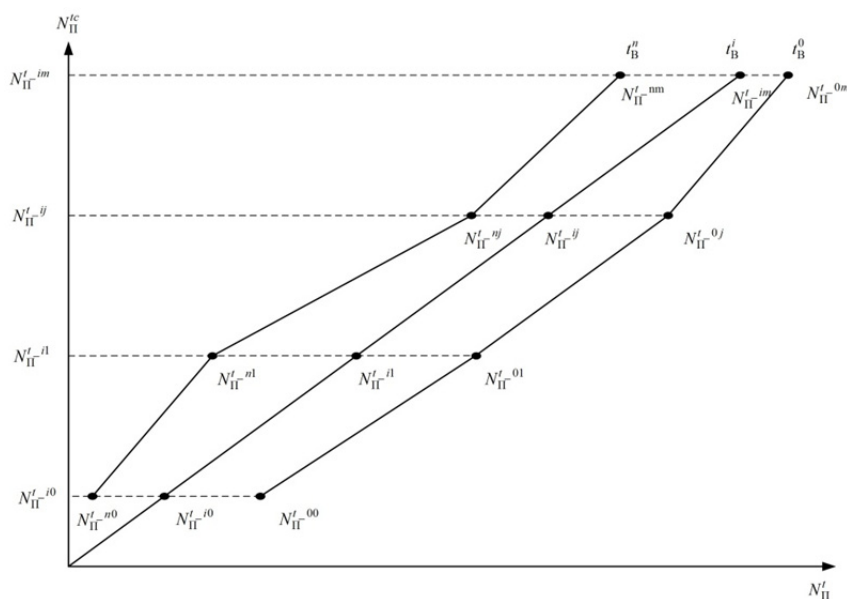
Целью настоящей работы является усовершенствование методики температурной коррекции, описанной в [6], а именно: повышение быстродействия и уменьшение объема памяти, занимаемого необходимыми для выполнения коррекции коэффициентами в ПЗУ МК, при сохранении последовательности операций, показанной на рис. 2, б. Одной из составляющих, необходимых для выполнения поставленной задачи, является отказ от кусочно-линейной интерполяции и, следовательно, применение только полиномиальной аппроксимации. Это будет иметь большое значение при обработке сигнала ограниченными вычислительными ресурсами микроконтроллера, так как степенные многочлены легко вычислить за конечное число шагов и проводить операции дифференцирования и интегрирования с применением только основных арифметических операций [7–10].

Основной задачей методики коррекции температурной погрешности является приведение значения зависимостей $N_{\text{П}}^t = f(t_n)$ при $t_n \neq +25^\circ\text{C}$ к зависимости $N_{\text{П}}^t = f(t_{\text{П}})$ при $t_{\text{П}} = +25^\circ\text{C}$. Для выполнения этой задачи необходимым условием является проведение предварительных температурных испытаний датчика с заданием температур воздействия как на ПИП, так и на ВИП с целью получения исходных данных для проведения последующих расчетов. Количество точек температурной настройки определяется исходя из требований к температурной погрешности, но при этом следует учитывать, что увеличение числа точек ведет как к повышению точности аппроксимации, так и к усложнению методики и, как следствие, увеличению времени вычислений, осуществляемых МК. При осуществлении температурной коррекции кода выходного сигнала ПИП при температуре $t_{\text{П}}^j$ (где $j \in [0..m]$ – номер точки температурной настройки ПИП) температура $t_{\text{В}}^i$, воздействующая на измерительные цепи ВИП (где $i \in [0..n]$ – номер точки температурной настройки ВИП), вносит погрешность измерения как измеряемой величины x , так и температуры окружающей среды ПИП $t_{\text{П}}$.

Первым этапом методики коррекции температурной погрешности измерения входной величины x и температуры окружающей среды ПИП является формирование массивов, содержащих следующие данные: значения кода АЦП температуры ПИП N_{Π}^t , полученные с ДТ1 в точках температурной настройки ПИП и значения кода АЦП температуры ВИП $N_{\text{В}}^t$, полученные с ДТ2 (см. рис. 1), в точках температурной настройки ВИП. Эта операция необходима для выявления и анализа зависимости между величинами N_{Π}^t , t_{Π} и $t_{\text{В}}$. Всего предусматривается создание n массивов с использованием полученных данных, соответствующих числу точек температурной настройки $t_{\text{В}}$ и содержащих точки N_{Π}^{t-ij} , по m точек N_{Π}^{t-ij} в массиве, где m – число точек температурной настройки ПИП, показанных на рис. 3,а. Для определенности выберем значения $n = 3$ и $m = 4$.



а)



б)

Рис. 3. Графики температурных зависимостей:

$$a - N_{\Pi}^t = f(t_{\Pi}); \quad б - N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$$

Следующим этапом методики температурной коррекции температурной погрешности преобразования измеряемой величины x и температуры окружающей среды ПИП является переход из одной системы координат в другую, а именно: $(t_{\Pi}; N_{\Pi}^t) \rightarrow (N_{\Pi}^t; N_{\Pi}^{tc})$, где N_{Π}^{tc} – скорректированный код АЦП температуры ПИП, значения которого численно равны N_{Π}^t при $t_{\Pi} = +25$ °С (рис. 3,б). Этот переход дает возможность исключить из методики процедуру поиска участка температурной зависимости кода температуры ПИП и ВИП, что приводит к повышению быстродействия интеллектуального датчика. Степень полинома, который будет аппроксимировать зависимости $N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$ для каждой из $t_{\text{В}}^i$ в новой системе координат, будет зависеть от количества точек температурной настройки $t_{\text{В}}^i$. При числе точек температурной настройки $m > 4$, $n > 4$ лучшим решением будет являться применение интерполяции сплайнами, так как, хотя увеличение степени полинома снижает неадекватность модели заданной функции преобразования, оно приводит к вычислительным сложностям, что является важным требованием при ограниченных вычислительных ресурсах микроконтроллера.

Массивы данных, сформированные на предыдущих этапах, с учетом смены системы координат позволяют записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} N_{\Pi}^{t-i0} = a_{03}(N_{\Pi}^{t-00})^3 + a_{02}(N_{\Pi}^{t-00})^2 + a_{01}N_{\Pi}^{t-00} + a_{00} \text{ для } t_{\text{В}}^0; \\ \dots \\ N_{\Pi}^{t-i0} = a_{i3}(N_{\Pi}^{t-i0})^3 + a_{i2}(N_{\Pi}^{t-i0})^2 + a_{i1}N_{\Pi}^{t-i0} + a_{i0} \text{ для } t_{\text{В}}^i; \\ \dots \\ N_{\Pi}^{t-i0} = a_{n3}(N_{\Pi}^{t-n0})^3 + a_{n2}(N_{\Pi}^{t-n0})^2 + a_{n1}N_{\Pi}^{t-n0} + a_{n0} \text{ для } t_{\text{В}}^n. \end{cases} \quad (1)$$

Выполняя аналогичные действия для каждого массива, аппроксимирующего зависимости $N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$ для каждой из $t_{\text{В}}^i$, возможно записать аналогичные системы уравнений, которые можно представить в общем виде как

$$N_{\Pi}^{tc} = N_{\Pi}^{t-ij} = \sum_{j=0}^{m-1} a_{ij}(N_{\Pi}^t)^j \text{ для } i \in [0 \dots n-1], j \in [0 \dots m-1]. \quad (2)$$

Решая систему нелинейных уравнений (1), получаем значения коэффициентов a_{ij} . Процесс решения может упростить тот факт, что при определенных выше условиях все коэффициенты полинома, интерполирующего зависимость $N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$ при $t_{\text{В}} = +25$ °С, представленного на рис. 2,б, будут равны 0, кроме множителя при первой степени полинома, который равен 1.

Из системы (1) можно увидеть зависимость коэффициентов a_{ij} от кода температуры ВИП $N_{\text{В}}^t$. Эта зависимость представлена на рис. 4. На данном этапе методики формируется n массивов, каждый из которых содержит n элементов – коэффициентов полинома a_{ij} , находящиеся при члене полинома одной и той же степени для каждой из m точек температурной настройки ВИП $t_{\text{В}}^i$.

Каждую из представленных зависимостей можно аппроксимировать полиномом второй степени; эти полиномы составляют систему уравнений:

$$\begin{cases} a_{i3} = b_{23}(N_{\text{В}}^{t-i})^2 + b_{13}N_{\text{В}}^{t-i} + b_{03}, \\ a_{i2} = b_{22}(N_{\text{В}}^{t-i})^2 + b_{12}N_{\text{В}}^{t-i} + b_{02}, \\ a_{i1} = b_{21}(N_{\text{В}}^{t-i})^2 + b_{11}N_{\text{В}}^{t-i} + b_{01}, \\ a_{i0} = b_{20}(N_{\text{В}}^{t-i})^2 + b_{10}N_{\text{В}}^{t-i} + b_{00}. \end{cases} \quad (3)$$

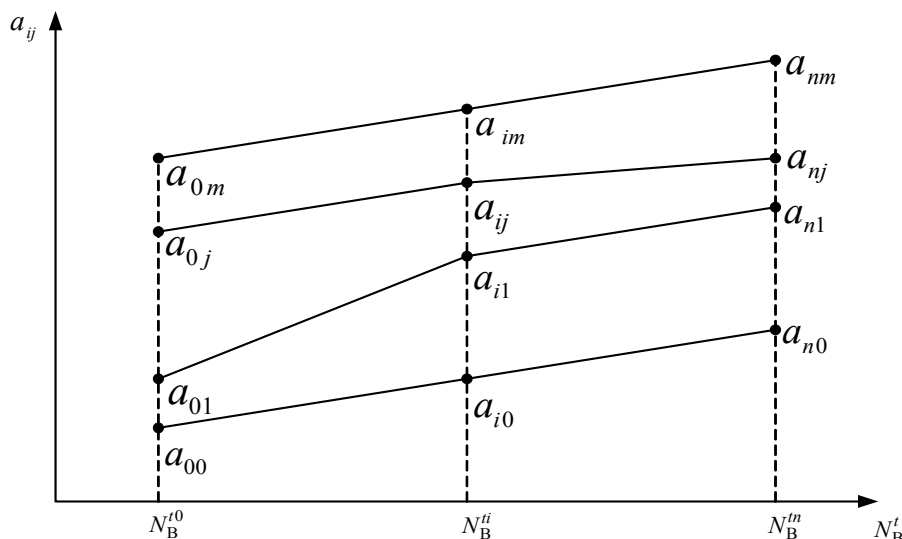


Рис. 4. Зависимость коэффициентов полиномиальной зависимости $N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t)$ от кода температуры ВИП N_B^t

В общем виде эта система уравнений записывается как

$$a_{ij} = \sum_{i=0}^{n-1} b_{ij} (N_B^t)^i \text{ для } j \in [0 \dots m]. \quad (4)$$

Решая систему нелинейных уравнений (3), получаем значения коэффициентов b_{ij} .

Процесс решения систем (1), (3) может быть оптимизирован, если принять во внимание тот факт, что в системах уравнений (1), (3) неизвестные – коэффициенты полинома – находятся в первой степени, а известные нам данные являются степенными членами уравнения. То есть решается не система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), а система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). В этом случае коэффициенты уравнения достаточно легко отыскать, применяя метод Гаусса, программная реализация которого больше подходит для ограниченных вычислительных ресурсов МК.

Выполнив подстановку выражения (4) в выражение (2), получим уравнение для выполнения температурной коррекции N_{Π}^t на последнем этапе методики:

$$N_{\Pi}^{tc} = f(N_{\Pi}^t, N_B^t) = \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{i=0}^{n-1} b_{ij} (N_B^t)^i (N_{\Pi}^t)^j. \quad (5)$$

Оценим приведенную погрешность вычислений, выполненных согласно шагам описанной методики. Приведенная погрешность рассчитывается по следующей формуле:

$$\gamma_{\text{прив}} = \frac{N_{\Pi}^{t \cdot i} - N_{\Pi}^{t \cdot im}}{N_{\Pi}^{th} - N_{\Pi}^{tl}} \cdot 100 \%,$$

где $N_{\Pi}^{t \cdot i}$ – код АЦП температуры ПИП в нормальных климатических условиях; $N_{\Pi}^{t \cdot im}$ – измеренный код АЦП температуры ПИП; N_{Π}^{th} – код АЦП температуры ПИП при максимальной рабочей температуре ПИП; N_{Π}^{tl} – код АЦП температуры ПИП при минимальной рабочей температуре ПИП. После применения методики коррекции температурного воздействия t_B для одинаковых наборов данных приведенная погрешность достигает не более 0,01 % от общего диапазона кодов АЦП против 4,29 % для методики температурной коррекции [6].

Заключение

Из формулы (5) следует, что предложенная методика температурной коррекции позволяет осуществлять температурную коррекцию с применением лишь текущих значений N'_B и N'_{II} . Таким образом, из процесса температурной коррекции исключаются операции поиска участка характеристики, к которому принадлежат измеренные значения N'_B и N'_{II} , что позволяет повысить частоту обработки измеряемой величины и уменьшить занимаемый коэффициентами объем памяти ПЗУ МК, так как сокращено число данных, вносимых в ПЗУ. Также по сравнению с предыдущим вариантом методики снижена приведенная погрешность обработки измеряемой величины.

Список литературы

1. Маланин, В. П. Устройство коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков давления / В. П. Маланин, А. Л. Шамраков, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 3 (9). – С. 71–75.
2. Измерительные цепи высокотемпературных емкостных датчиков давления / В. П. Арбузов, М. А. Мишина, П. Н. Бельнцева, И. Ю. Ананьина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1 (11). – С. 81–87.
3. Маланин, В. П. О применимости метода импедансного анализа для коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков / В. П. Маланин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 52–56.
4. О полиномиальной коррекции температурных погрешностей акселерометрических датчиков / Д. Г. Миловзоров, Е. С. Морозова, Г. Н. Ковшов, А. В. Ужеловский // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18, № 1 (62). – С. 79–83.
5. Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления / А. Ю. Николаенко, А. А. Львов, П. А. Львов и др. – Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (77). – С. 154–160.
6. Алгоритм температурной коррекции первичного измерительного преобразователя // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. Международ. науч.-техн. конф. (Пенза, 19–21 мая 2015). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – С. 237–239.
7. Самарский, А. А. Введение в численные методы / А. А. Самарский – М. : Наука, 1982. – 272 с.
8. Волков, Е. А. Численные методы / Е. А. Волков. – М. : Наука, 1987. – 248 с.
9. Хемминг, Р. В. Численные методы / Р. В. Хемминг. – М. : Наука, 1972. – 400 с.
10. Каханер, Д. Численные методы и математическое обеспечение : пер. с англ. / Д. Каханер, К. Моулера, С. Нэш ; под ред. Х. Д. Икрамова. – М. : Мир, 1998. – 575 с.

Исанбаев Олег Николаевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ingen.ole@yandex.ru

Isanbaev Oleg Nikolaevich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Куликов Дмитрий Сергеевич

инженер-программист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: kulikovdmitriy@rambler.ru

Kulikov Dmitriy Sergeevich

engineer-programmer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.3.088.7

Исанбаев, О. Н.

Методика предварительной температурной коррекции показаний первичного измерительного преобразователя интеллектуального датчика перемещений / О. Н. Исанбаев, Д. С. Куликов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 58–65.