

Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления

А. В. Филатов, К. А. Сердюков, А. А. Новикова

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Российская Федерация,
e-mail: filsash@mail.ru, konstantinserdyukov@gmail.com, nerra-nerra@mail.ru

Рассмотрены вопросы применения линейных измерительных устройств для измерения температуры. При измерениях температуры резистивными термодатчиками предложено использовать модифицированный нулевой метод, который обеспечивает инвариантность измерителя к изменениям коэффициента усиления измерительного тракта. Нулевой баланс в измерительном тракте автоматически поддерживается синхронным выполнением амплитудно-импульсной и широтно-импульсной модуляций и использованием следящей схемы регулировки длительности широтного сигнала. При достижении нулевого баланса длительность импульса управления широтной модуляцией связана линейной зависимостью с сопротивлением термодатчика. Модификация нулевого метода позволяет упростить конструкцию термометра с резистивным чувствительным элементом и повысить точность и линейность его характеристики преобразования путём замены активных прецизионных узлов двумя пассивными – прецизионными сопротивлениями. Рассмотрены погрешности измерений температуры модифицированным нулевым методом. Описана калибровка изготовленного цифрового термометра с миниатюрным резистивным термодатчиком из платины. Предложенную модификацию нулевого метода измерений можно применять при создании приборов, содержащих датчик с чувствительным элементом – электрическим сопротивлением, изменяющимся под воздействием неэлектрической величины.

Ключевые слова: измерение температуры, резистивные термодатчики, модификация нулевого метода измерения.

Введение. Измерение температуры как физической величины является довольно типичной задачей. Линейность температурной шкалы приводит к необходимости применения линейных измерительных устройств, их передаточные характеристики можно описать системой уравнений

$$\begin{cases} Y = B + AX; \\ Y = B - AX, \end{cases} \quad (1)$$

где X , Y – входной и выходной сигналы соответственно; A , B – коэффициенты, обуславливающие соответственно наклон и смещение линейной характеристики преобразования.

В терминах теории электрических цепей коэффициенты определяют значения сигналов двух внутренних опорных элементов (источников) измерительного устройства, настраиваемых в ходе калибровки. При двухточечной калибровке ко входу измерительного устройства поочередно подключают два источника эталонных сигналов. В процессе регулировки опорных внутренних элементов значения подаваемых на вход эталонных сигналов приписывают этим элементам. Далее указанные значения запоминают и используют как эталонные. Этими эталонными значениями определяется линейная передаточная характеристика измерительного устройства.

В [1] описаны термометры с измерительным мостом Уитстона, в одно из плеч которого включён чувствительный резистивный элемент (термосопротивление), и дифференциальным усилителем. В этих термометрах первая опорная величина, отвечающая за смещение характеристики преобразования, определяется из условия баланса моста: на входе дифференциального усилителя разность потенциалов должна быть равна нулю. При изменении температуры мост разбалансируется и на выходе усилителя появляется сигнал. Крутизну характеристики определяет коэффициент усиления усилителя, который характеризует вторую опорную величину.

Недостаток большинства измерителей температуры с резистивными термодатчиками связан с мультипликативной погрешностью второй опорной величины, определяющей крутизну передаточной характеристики (коэффициента A в системе (1)). Дрейф и флуктуации коэффициента усиления измерительного тракта термометра, а также нелинейность характеристики преобразования приводят к появлению погрешности измерений.

В [2] описан цифровой термометр, принцип работы которого основан на нулевом методе измерений. Главное достоинство этого метода – устранение влияния изменений коэффициента усиления измерительного тракта на точность измерений.

В термометре выравнивание напряжений на входах компаратора достигается регулировкой напряжения с выхода цифроаналогового преобразователя. Используются три активных прецизионных источника: тока, питающего терморезистивный элемент; опорного напряжения цифроаналогового преобразователя; напряжения смещения. Настройкой напряжения смещения в процессе калибровки устанавливают начальное значение шкалы измерения температуры, а регулировкой опорного источника – наклон линейной характеристики измерителя (настройка на верхнюю границу диапазона).

Цель настоящей статьи – модифицировать нулевой метод [3, 4] так, чтобы упростить конструкцию термометра с резистивным чувствительным элементом и повысить точность и линейность его характеристики преобразования путём замены активных прецизионных узлов двумя пассивными – прецизионными сопротивлениями.

Модификация нулевого метода. Особенность модификации нулевого метода заключается в авторегулировании нулевого баланса с использованием комбинированной модуляции, включающей синхронно выполняемые амплитудно-импульсную (АИМ) и широтно-импульсную (ШИМ) модуляции [5]. При достижении нулевого баланса в измерителе длительность широтно-импульсного сигнала управления ШИМ косвенно связана линейным соотношением с сопротивлением термодатчика.

Рассмотрим модификацию метода на примере устройства измерения температуры, структурная схема устройства приведена на рис. 1. Для выполнения импульсных модуляций в схему термометра введены электронные ключи Кл1–Кл3.

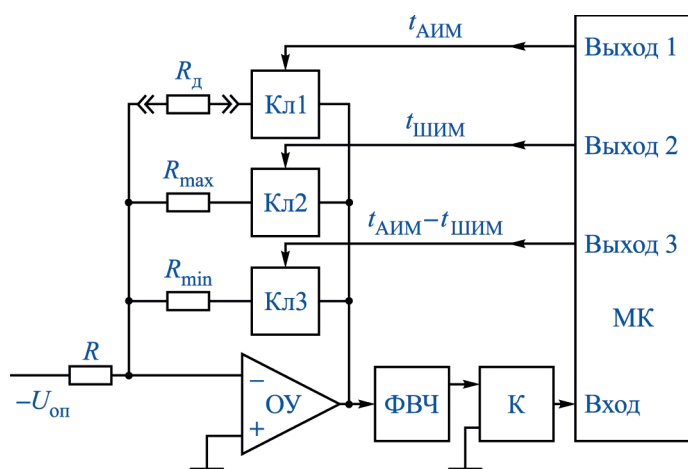


Рис. 1. Структурная схема термометра, реализующего модифицированный нулевой метод измерений:

Кл1–Кл3 – электронные ключи; ОУ – операционный усилитель; ФВЧ – фильтр верхних частот; К – компаратор; МК – микроконтроллер

Fig. 1. The structural diagram of a thermometer that implements a modified zero method of measurement:

K1–K3 – electronic keys; OA – operational amplifier; HF – high-pass filter; C – comparator; MC – microcontroller

Временные диаграммы $U_{\text{вых.1}}^{\text{МК}}(t)$, $U_{\text{вых.2}}^{\text{МК}}(t)$, $U_{\text{вых.3}}^{\text{МК}}(t)$ поступающих от микроконтроллера импульсов управления ключами показаны на рис. 2. В любой момент времени замкнутым является только один ключ. Импульсы управления АИМ длительностью $t_{\text{АИМ}}$, следующие со скважностью 2, замыкают ключ Кл1. ШИМ выполняется в ключе Кл2 по управляющим импульсам длительностью $t_{\text{ШИМ}}$. В промежутке времени после окончания ШИМ и до начала действия сигнала управления АИМ вырабатывается импульс длительностью $t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}$, по которому замыкается ключ Кл3.

Операционный усилитель ОУ включён по инвертирующей схеме (см. рис. 1). В цепи его отрицательной обратной связи установлены сопротивления R_{max} , R_{min} , определяющие соответственно верхнюю и нижнюю границы температурной шкалы, и сопротивление R_d резистивного термодатчика. Подключение одного из сопротивлений в цепь обратной связи усилителя ОУ происходит замыканием ключей, управляемых микроконтроллером МК. На вход операционного усилителя через резистор R поступает постоянное опорное напряжение отрицательной полярности $-U_{\text{оп}}$. В результате синхронной работы ключей на выходе операционного усилителя (см. рис. 2, диаграмма $U_{\text{вых}}^{\text{ОУ}}(t)$) формируется периодическая последовательность трёх повторяющихся уровней положительного напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= U_{\text{оп}}(R_d + R_k)/R; \\ U_{\text{max}} &= U_{\text{оп}}(R_{\text{max}} + R_k)/R; \\ U_{\text{min}} &= U_{\text{оп}}(R_{\text{min}} + R_k)/R, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где R_k – сопротивление электронных ключей в открытом состоянии.

В интегральном исполнении ключи имеют практически одинаковое сопротивление, которое может составлять менее 1 Ом.

После прохождения выходного сигнала операционного усилителя через фильтр верхних частот ФВЧ (см. рис. 1, 2) исключается постоянная составляющая сигнала и временная диаграмма на выходе фильтра смещается вниз относительно нулевой оси времени. Индикатором нулевого баланса в термометре служит отсутствие напряжения на входе компаратора К при замкнутом ключе Кл1, когда по измерительному тракту проходит сигнал с подключённым в цепи обратной связи ОУ термосопротивлением в течение управляющего импульса АИМ. Для достижения нулевого баланса в измерительном тракте термометра микроконтроллером МК направленно изменяется длительность ШИМ. При увеличении длительности $t_{\text{ШИМ}}$ последовательность сигналов на входе компаратора сдвигается вниз относительно нулевой оси времени, при уменьшении $t_{\text{ШИМ}}$ эта последовательность сдвигается вверх.

Регулирование длительности $t_{\text{ШИМ}}$ производится по изменению выходного сигнала компаратора, работающего в режиме нуля-органа и сравнивающего входное напряжение с нулевым потенциалом (определение полярности входного напряжения). Для этого другой вход компаратора соединён с общей точкой схемы термометра – точкой отсчёта потенциалов (см. рис. 1).

На временной диаграмме $U_{\text{вых}}^{\text{ФВЧ}}(t)$ (см. рис. 2) показано состояние достигнутого нулевого баланса, для которого выполняется равенство вольт-секундных площадей S_1 , S_2 положительного и отрицательного импульсов:

$$U_+ t_{\text{ШИМ}} = U_- (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}); \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} U_+ &= U_{\text{max}} - U_{\text{д}} \\ U_- &= U_{\text{д}} - U_{\text{min}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где U_+ , U_- – соответственно амплитуды положительного и отрицательного импульсов.

Подставим систему (4) в уравнение (3), решим полученное равенство относительно длительности сигнала ШИМ и получим

$$t_{\text{ШИМ}} = (U_{\text{д}} - U_{\text{min}}) t_{\text{АИМ}} / (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}). \quad (5)$$

После подстановки в формулу (5) значений из соотношений (2) получим окончательное выражение для длительности сигнала ШИМ, из которого косвенно можно определить сопротивление датчика:

$$t_{\text{ШИМ}} = (R_{\text{д}} - R_{\text{min}}) t_{\text{АИМ}} / (R_{\text{max}} - R_{\text{min}}). \quad (6)$$

Формула (6) является математической моделью реализации модификации нулевого метода работы измерителя температуры, из которой следует линейная зависимость между длительностью сигнала ШИМ и сопротивлением термодатчика. Поэтому линейность температурной шкалы термометра будет определяться только характеристиками самого датчика. В выражение (6) не входит напряжение опорного источника $U_{\text{оп}}$ и сопротивления R , $R_{\text{к}}$. Сопротивление R подключено на вход операционного усилителя, а $R_{\text{к}}$ является сопротивлением электронных ключей в открытом состоянии. Единственное предъявляемое к ним требование заключается в сохранении значений в течение периода АИМ.

Погрешности измерений температуры модифицированным нулевым методом. Реализованный в термометре модифицированный нулевой метод измерения позволяет устранить систематическую погрешность. Эта погрешность возникает в измерительном тракте и обусловлена током сдвига и напряжением смещения операционного усилителя, которые как постоянно действующие величины отфильтровываются в фильтре верхних частот. При использовании данного метода цифровой выходной сигнал получается в ходе преобразования длительности сигнала ШИМ в код без использования стандартных аналого-цифровых преобразователей.

В термометре фильтр верхних частот первого порядка, представляющий собой разделительную RC -цепь, предназначен для исключения в сигналах постоянной составляющей с минимальными искажениями формы проходящих через фильтр сигналов. Чтобы искажения были минимальными, для постоянной времени фильтра должно выполняться условие, согласно которому граничная частота амплитудно-частотной характеристики фильтра в 10 раз меньше частоты АИМ. Это достигается при выполнении равенства

$$RC = t_{\text{АИМ}} / (10\pi). \quad (7)$$

Так как модификация метода заключается в сравнении вольт-секундных площадей импульсов на входе компаратора, поэтому на точность измерений оказывает влияние скорость переключения ключей. В микроконтроллере термометра выходной сигнал представлен в цифровом коде длительности $t_{\text{ШИМ}}$. При автоматической регулировке нулевого баланса изменение длительности происходит в течение временного интервала, соответствующего изменению кода микроконтроллера на один младший разряд. Чтобы не вносить погрешностей измерения, время переключения ключей $t_{\text{к}}$ не должно превышать половину временного интервала изменения $t_{\text{ШИМ}}$:

$$t_{\text{к}} \leq t_{\text{АИМ}} / 2^{n+1}, \quad (8)$$

где n – количество разрядов цифрового кода длительности $t_{\text{ШИМ}}$ в микроконтроллере.

Из условия (7) также выбирается длительность $t_{\text{АИМ}}$ управляющего импульса АИМ. Увеличение длительности $t_{\text{АИМ}}$ приводит к возрастанию относительного спада (скола)

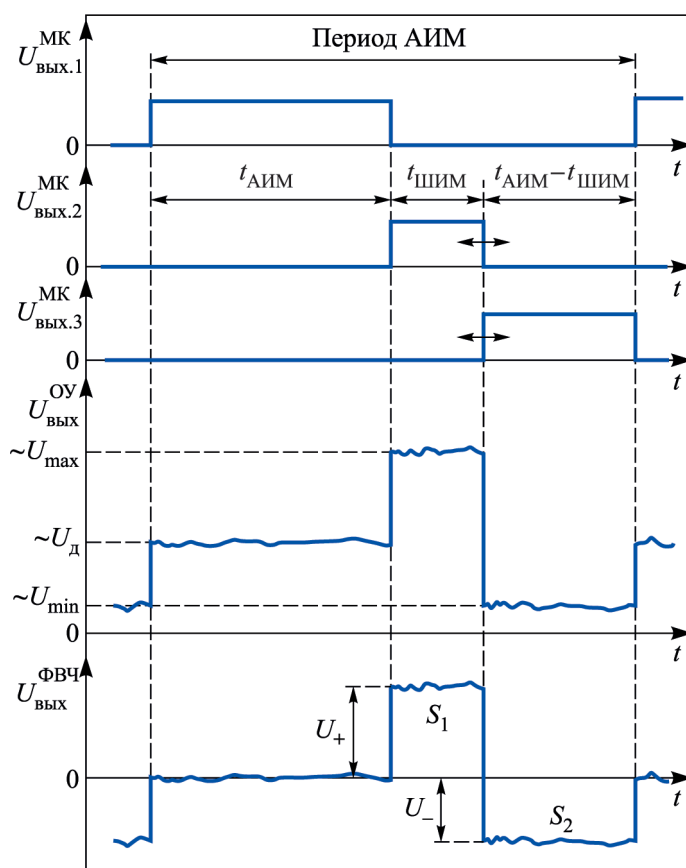


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие реализацию в термометре модифицированного нулевого метода измерений

Fig. 2. Timing diagrams explaining the principle of the implementation of the modification of the zero method of measurement in a thermometer

вершин положительного и отрицательного импульсов на выходе фильтра верхних частот и появлению дополнительных погрешностей. Чтобы этого не происходило, согласно формуле (7) граничную частоту фильтра верхних частот необходимо уменьшать при соответствующем увеличении постоянной времени RC -цепи фильтра. Уменьшение длительности $t_{\text{АИМ}}$ непосредственно связано с разрешающей способностью измерителя (количество разрядов цифрового кода длительностью $t_{\text{ШИМ}}$) и временем переключения ключей.

Увеличение длительности импульса управления АИМ уменьшает быстродействие измерителя, поэтому в описанном термометре длительность рассчитывали с учётом соотношения (8) по формуле

$$t_{\text{АИМ}} = (1,3 \dots 1,5) t_k 2^{n+1}. \quad (9)$$

Для ключей с временем переключения $t_k = 0,1$ мкс и количеством разрядов $n = 12$ по формуле (9) получили значение длительности $t_{\text{АИМ}} = 900$ мкс.

Как следует из формулы (6), двумя опорными элементами в измерителе являются сопротивления R_{max} , R_{min} , которые должны быть прецизионными. Выразим из соотношения (6) сопротивление термодатчика:

$$R_d = R_{\text{min}} + (R_{\text{max}} - R_{\text{min}}) t_{\text{ШИМ}} / t_{\text{АИМ}}. \quad (10)$$

Границам шкалы измерений соответствуют два крайних значения длительности сигнала ШИМ – нуль и $t_{\text{АИМ}}$. Если в формуле (10) $t_{\text{ШИМ}} = 0$, тогда $R_d = R_{\text{min}}$. При $t_{\text{ШИМ}} = t_{\text{АИМ}}$ сопротивление термодатчика $R_d = R_{\text{max}}$. Следовательно, R_{max} и R_{min} определяют соответственно нижнюю и верхнюю границы диапазона измерений. Регулируя сопротивления R_{max} и R_{min} , можно настраивать произвольный температурный диапазон термометра в процессе калибровки.

Калибровка термометра. Калибровку термометра разбивают на два этапа. В начале первого этапа датчик помещают в среду с известной температурой, определяющей нижнюю границу диапазона температур. На этом этапе сигнал ШИМ не вырабатывается ($t_{\text{ШИМ}} = 0$). Регулируют сопротивление R_{min} до исчезновения на входе компаратора сигнала с частотой АИМ (на выходе фильтра верхних частот в оба полупериода АИМ сигналы будут нулевыми). При этом логический пробник, подключённый к выходу компаратора, фиксирует случайно повторяющиеся переходы между логическим нулём и единицей.

На втором этапе датчик помещают в среду с температурой, определяющей верхнюю границу шкалы измерений. На протяжении всего этапа длительность сигнала ШИМ устанавливают равной длительности управляющего импульса АИМ ($t_{\text{ШИМ}} = t_{\text{АИМ}}$). Регулировку сопротивления R_{max} выполняют аналогично регулировке сопротивления R_{min} на первом этапе до момента исчезновения сигнала АИМ на входе компаратора.

При регулировке сопротивления R_{max} выходное напряжение операционного усилителя не должно превышать значение, выше которого усилитель ОУ переходит в нелинейный режим. Ограничение выходного сигнала связано со значением

напряжения $U_{\text{ИП}}$ биполярного источника питания усилителя (на рис. 1 не показан), и наступает при превышении выходным напряжением порогового значения, равного $U_{\text{ИП}} - 1,5$ В. Чтобы этого не происходило, подключаемое на вход операционного усилителя сопротивление R должно отвечать условию

$$R \geq R_{\text{max}} |U_{\text{оп}}| / (U_{\text{ИП}} - 1,5).$$

От сопротивления R зависит сила тока, протекающего через резистивный термодатчик. Увеличение силы тока приводит к дополнительному разогреву активной зоны датчика и появлению погрешностей. Поэтому требуется выбирать как можно меньшую силу тока, но не ниже значения, при котором влияние аддитивных тепловых шумов становится существенным.

По схеме рис. 1 был собран цифровой термометр с миниатюрным резистивным термодатчиком из платины. В процессе калибровки термометра с использованием термопечи настроили исследуемый температурный диапазон 100–250 °С. В микроконтроллере длительность сигнала ШИМ преобразовывалась в цифровой код. Температуру рассчитывали по формуле

$$T = T_{\text{min}} + (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) N_{\text{вых}} / (N_{\text{max}} + 1),$$

где T_{min} , T_{max} – значения хранящихся в микроконтроллере минимальной и максимальной температур измерительной шкалы в градусах Цельсия; $N_{\text{вых}}$ – цифровой код длительностью $t_{\text{ШИМ}}$; N_{max} – максимальный цифровой код длительностью сигнала ШИМ, когда все разряды кода установлены в состояние логической единицы (эквивалент длительности $t_{\text{АИМ}}$).

Для двенадцатиразрядного цифрового кода выходного сигнала термометра разрешение составило 0,037 °С. Максимальное отклонение характеристики измерителя от прямой линии во всём диапазоне измеряемых температур не превысило 0,1 °С. Погрешность термометра определяли методом сравнения с показаниями принятого за эталон измерителя СТН6200 (АО «ВИКА МЕРА», Россия) в процессе прогрева внутреннего объёма печи от минимальной до максимальной температуры.

Работа термометра основана на импульсных модуляциях, поэтому проверяли влияние переходных процессов в измерительных цепях в процессе коммутации ключей. Аperiodический характер переходных процессов обеспечивали соответствующим конструктивным исполнением и разводкой печатной платы схемы термометра, уменьшающими влияние распределённых реактивностей.

Необходимо отметить, что чувствительный элемент датчика можно изготавливать из различных материалов, например, из никеля, меди и т. д. [6]. Выбор материала резистора датчика зависит от диапазона измеряемых температур и необходимой точности измерений, которая в первую очередь связана с линейностью градуировочной характеристики датчика.

Заключение. Предложенный в статье принцип модификации нулевого метода измерений можно использовать при создании приборов, например, для измерения освещённости,

влажности, механических деформаций (в тензометрии), применяемых в газовом анализе и других областях. В состав таких приборов входит датчик с чувствительным элементом — электрическим сопротивлением, изменяющимся под воздействием неэлектрической величины.

Список литературы

1. Клаассен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике: Пер. с англ. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
2. Джонс М. Х. Электроника — практический курс: Пер. с англ. М.: Постмаркет, 1999. 528 с.
3. Филатов А. В. Анализ источников погрешностей входного блока модифицированного нулевого микроволнового радиометра // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 40–43.
4. Filatov A. V., *Modern Instrumentation*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 1931. <https://doi.org/10.4236/mi.2015.43003>
5. Пат. № 2485462 РФ / А. В. Филатов, А. Г. Лощилов, А. В. Убайчин // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 17.

6. Шахов Э. К. Об одной возможности терморезистивного измерения температуры // Датчики и системы. 2005. № 3. С. 13–15.

References

1. Klaassen K. B., *Electronic measurement and instrumentation*, Cambridge University Press, 1996. 528 p.
2. Jones M. H., *A practical introduction to electronic circuits*, Cambridge University Press, 1998. 352 p.
3. Filatov A. V., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 266271. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0956-7>
4. Filatov A. V., *Modern Instrumentation*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 1931. <https://doi.org/10.4236/mi.2015.43003>
5. Filatov A. V., Lochilov A. G., Ubaichin A. V., RF Patent no. 2485462, *Byull. Izobret.*, no. 17 (2013)
6. Shakhov E. K., *Datchiki i Sistemyi*, 2005, no. 3, pp. 1315 (in Russian).

Дата поступления: 12.02.2020.

Дата принятия: 28.04.2020.

Prospects for the use of a modified zero method for measuring temperature with resistance sensors

Alexander V. Filatov, Konstantin A. Serdyukov, Anastasiya A. Novicova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: filmsash@mail.ru, konstantinserdyukov@gmail.com, nerra-nerra@mail.ru

The issues of the use of linear measuring devices for measuring temperature are considered. A method for measuring temperature by resistive temperature sensors based on a modification of the zero method is described. This modification ensures the invariance of the meter to changes in the gain of the measuring path. Zero balance in the measuring path is automatically supported by the synchronous execution of pulse-amplitude and pulse-width modulation and using a tracking circuit for adjusting the width of the latitudinal signal. When reaching zero balance, the pulse width of the latitude modulation control is connected linearly with the resistance of the temperature sensor. The errors of temperature measurements by the modified zero method are considered. The calibration of the manufactured digital thermometer with a miniature resistive temperature sensor made of platinum is described. The proposed modification of the zero measurement method can be used to create devices containing a sensor with a sensitive element — electrical resistance, changing under the influence of a non-electric quantity.

Key words: temperature measurement, resistive temperature sensors, modification of the zero measurement method.