

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 623.4:621.3.083.7

doi:10.21685/2307-5538-2022-1-5

ПРИМЕНЕНИЕ ВРЕЯИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ДАТЧИКАХ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

А. В. Захаров¹, И. В. Либкинд², Л. Е. Шахмейстер³

^{1,2} АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод, Калуга, Россия

³ АО «НПО «Луч», Новосибирск, Россия

^{1,2,3} l.e.shahmejster@onegroup.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Учет температуры объекта автономными информационными и управляющими системами повышает точность их работы. Используемые чувствительные элементы для измерения температуры имеют аналоговый выход (напряжение), требующий преобразования в вид, пригодный для цифровой обработки. В этой связи возникает задача выбора чувствительного элемента и определения наиболее простого и точного метода преобразования его сигнала. *Материалы и методы.* Рассмотрены различные методы аналого-цифрового преобразования выходных сигналов полупроводникового термочувствительного элемента. *Результаты.* Предложено для построения датчика температуры использование времяимпульсного преобразования напряжения чувствительного элемента, основанного на температурной зависимости разности напряжений эмиттерных переходов двух транзисторов с разной плотностью эмиттерного тока. *Вывод.* Теоретически и экспериментально подтверждена возможность использования в автономных измерительных и управляющих системах датчиков температуры с полупроводниковым термочувствительным элементом и времяимпульсным преобразователем двойного интегрирования с фиксированными значениями пределов интегрирования. Показано, что упрощение датчика осуществляется за счет исключения из его состава датчика опорного временного интервала, а высокая точность времяимпульсного преобразования достигается отсутствием влияния нестабильности параметров интегратора на результаты измерения.

Ключевые слова: датчик температуры, полупроводниковый чувствительный элемент, времяимпульсное преобразование

Для цитирования: Захаров А. В., Либкинд И. В., Шахмейстер Л. Е. Применение времяимпульсного преобразования в датчиках температуры с полупроводниковым чувствительным элементом // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 38–46. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-5

APPLICATION OF TIME-PULSE CONVERSION IN TEMPERATURE SENSORS WITH SEMICONDUCTOR SENSITIVE ELEMENT

A.V. Zakharov¹, I.V. Libkind², L.E. Shakhmeyster³

^{1,2} JSC «Voskhod» – Kaluga Radio Tube Plant, Kaluga, Russia

³ JSC «NPO «Luch», Novosibirsk, Russia

^{1,2,3} l.e.shahmejster@onegroup.ru

Abstract. *Background.* Taking into account the temperature of the object by autonomous information and control systems increases the accuracy of their work. The temperature sensors used have an analog output (voltage), which requires conversion to a form suitable for digital processing. In this regard, there is a problem of selecting a sensitive ele-

ment and determining the simplest and most accurate method of converting its signal. *Materials and methods.* Various methods of analog-to-digital conversion of the output signals of a semiconductor thermosensitive element are considered. *Conclusions.* The possibility of using temperature sensors with a semiconductor thermosensitive element and a time-pulse converter of double integration with fixed values of the integration limits in autonomous measuring and control systems has been theoretically and experimentally confirmed. It is shown that the sensor is simplified by excluding the reference time interval from its composition, and the high accuracy of the time-pulse conversion is achieved by the absence of the influence of the instability of the integrator parameters on the measurement results.

Keywords: temperature sensor, semiconductor sensing element, pulse-time conversion

For citation: Zakharov A.V., Libkind I.V., Shakhmeyster L.E. Application of time-pulse conversion in temperature sensors with semiconductor sensitive element. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):38–46. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-5

В настоящее время в автономных информационных и управляющих системах (АИУС) актуальным является учет различных факторов, влияющих на точность их работы. Одним из таких существенных факторов является температура объекта управления, содержащего в частности пиротехнические узлы, параметры которых в значительной степени определяются температурой [1]. Измерение температуры может осуществляться датчиком, включаемым в состав АИУС.

Для измерения температуры нашли применение самые разнообразные датчики, в качестве чувствительных элементов которых используются металлическая проволока (медная, платиновая), терморезисторы, полупроводниковые элементы, термодпары и др. [2–4]. Информация о значении температуры в этих чувствительных элементах представляется в виде аналогового сигнала (напряжения, сопротивления и др.). Возможно также для измерения температуры применение кварцевых термочувствительных резонаторов, например типа РКТ206 ТУ25-1862.0013-88, выпускаемых ООО «СКТБ ЭлПА» [5]. Информацией о температуре в этих резонаторах является изменение частоты относительно исходного значения. Достоинством использования для измерения температуры кварцевыми термочувствительными резонаторами является возможность цифровой обработки информации без дополнительных преобразователей. Использование этих резонаторов в АИУС требует дополнительного изучения стабильности их характеристик в течение длительного срока хранения и обеспечения устойчивости к внешним механическим нагрузкам.

В ряде случаев для построения датчика температуры используют свойство $p-n$ -перехода, заключающееся в том, что падение напряжения на нем линейно зависит от его температуры [2]. Температурный коэффициент напряжения (ТКН) $p-n$ -перехода отрицателен и имеет типовое значение 2 мВ/°С. Недостатком $p-n$ -перехода как датчика температуры является довольно большое дифференциальное сопротивление (25...30 Ом при токе 1 мА). По этой причине для достижения приемлемых характеристик датчика $p-n$ -переход необходимо питать от стабилизатора тока. Кроме того, у диодов не нормированы ни сам ТКН, ни его стабильность, что затрудняет их применение в качестве термодатчиков.

Хорошими характеристиками обладают чувствительные элементы полупроводниковых датчиков температуры типа LM 135 фирмы ST Microelectronics [6] и отечественный типа 1019ЧЕ2АС [7], выпускаемый АО «Восход» – КРЛЗ.

Работа этих чувствительных элементов основана на зависимости от температуры разности значений напряжения на эмиттерном переходе $U_{БЭ}$ двух транзисторов с разной плотностью эмиттерного тока [2]. Эта разность $U_{БЭ}$ при заданном соотношении значений площади эмиттера транзисторов и равном токе через них (это и обеспечивает разную плотность тока) оказывается пропорциональной абсолютной температуре кристалла:

$$U_{БЭ} = \frac{kT^{\circ}K}{q} \ln M,$$

где k – постоянная Больцмана; $T^{\circ}K$ – температура в градусах Кельвина; M – отношение площадей эмиттеров транзисторов чувствительного элемента; q – заряд электрона.

С точки зрения схемотехники эти чувствительные элементы представляют собой двух-выводной стабилитрон, напряжение стабилизации которого имеет температурный коэффициент

ент 10 мВ/°С. Информацией об измеряемой температуре в этих датчиках является аналоговый сигнал – напряжение, для дальнейшей обработки информации требующий преобразования в сигнал, пригодный для цифровой обработки. Необходимое преобразование сигнала может осуществляться с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). В настоящее время нашли применения самые разнообразные АЦП [8]. Последовательные, параллельные или последовательно-параллельные АЦП осуществляют преобразование мгновенных значений напряжения $U_{\text{вх}}$ в цифровую форму в соответствии с выражением

$$N = 2^n \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{оп}}}, \quad U_{\text{вх}} = \frac{N}{2^n} U_{\text{оп}},$$

где N – двоичный код, соответствующий преобразуемому входному напряжению $U_{\text{вх}}$; n – разрядность двоичного кода.

Для обеспечения высокой точности необходимо усреднение получаемой информации по результатам некоторого количества преобразований.

В АЦП с времяимпульсным преобразованием [8] осуществляется преобразование измеряемого напряжения $U_{\text{вх}}$ во временной интервал t . Для этого используется генератор пилообразного напряжения с напряжением, изменяющимся от максимального значения до нулевого (минимального).

Выходной временной интервал t соответствует временному интервалу между фиксируемым компаратором моментом равенства входного напряжения пилообразному напряжению и моментом равенства пилообразного напряжения нулевому значению.

При времяимпульсном преобразовании реализуется зависимость:

$$t = \frac{U_{\text{вх}}}{k}, \quad U_{\text{вх}} = k t,$$

где k – крутизна выходного сигнала генератора пилообразного напряжения.

Недостатком этого АЦП является необходимость формирования пилообразного напряжения с обеспечением высокой точности его крутизны. Кроме того, так же, как и в предшествующем АЦП, требуется усреднение получаемого результата по ряду последовательных преобразований.

АЦП с двухэтапным интегрированием также относятся к АЦП с времяимпульсным преобразованием. На первом этапе осуществляется интегрирование входного сигнала $U_{\text{вх}}$ в течение фиксированного временного интервала t_1 . До интегрирования выходное напряжение интегратора равно начальному, например нулевому, значению. На втором этапе осуществляется интегрирование опорного напряжения $U_{\text{оп}}$, полярность которого противоположна полярности напряжения входного сигнала. Время интегрирования на втором этапе равно t_2 . Второй этап интегрирования заканчивается при начальном значении напряжения на выходе интегратора.

Двухэтапное интегрирование позволяет снизить требования по точности компаратора и интегратора, в частности его постоянной интегрирования.

Если параметры интегрирования входного $U_{\text{вх}}$ и опорного $U_{\text{оп}}$ напряжений одинаковы, то рассматриваемое преобразование осуществляется в соответствии с выражением

$$t_2 = t_1 \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{оп}}}, \quad U_{\text{вх}} = U_{\text{оп}} \frac{t_2}{t_1} U_{\text{эт}}.$$

Достоинством рассмотренного АЦП является получение информации не о мгновенном, а о среднем за время интегрирования t_1 значении входного напряжения. Недостатком этого преобразователя является необходимость включения в его состав формирователя временного интервала t_1 при интегрировании входного напряжения $U_{\text{вх}}$. Устранить этот недостаток можно, внося изменения в известный АЦП [8]. Изменения заключаются в интегрировании входного напряжения $U_{\text{вх}}$ не в течение фиксированного времени t_1 , а в течение времени изменения напряжения на выходе интегратора от одного до другого пороговых напряжений.

На рис. 1 приведена функциональная схема датчика температуры с времяимпульсным выходом, использующая полупроводниковый чувствительный элемент 1019ЧЕ2АС [7] и АЦП с двухэтапным интегрированием и фиксированным значением пределов интегрирования.

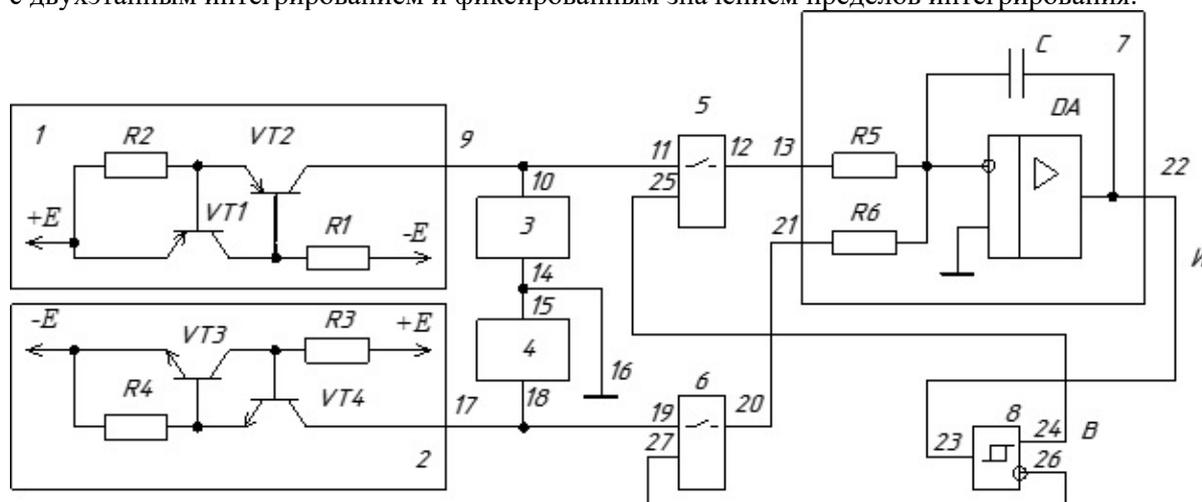


Рис. 1. Функциональная схема датчика температуры с импульсным выходом

Датчик температур состоит из двух токозадающих цепей 1, 2, термочувствительного элемента 3 и источника опорного напряжения 4, двух ключей 5, 6, интегратора 7 и триггера Шмитта 8. Питание токозадающих цепей 1, 2 осуществляется от источника питания $+E$, $-E$. Циклограмма сигналов, иллюстрирующая работу датчика температуры, приведена на рис. 2.

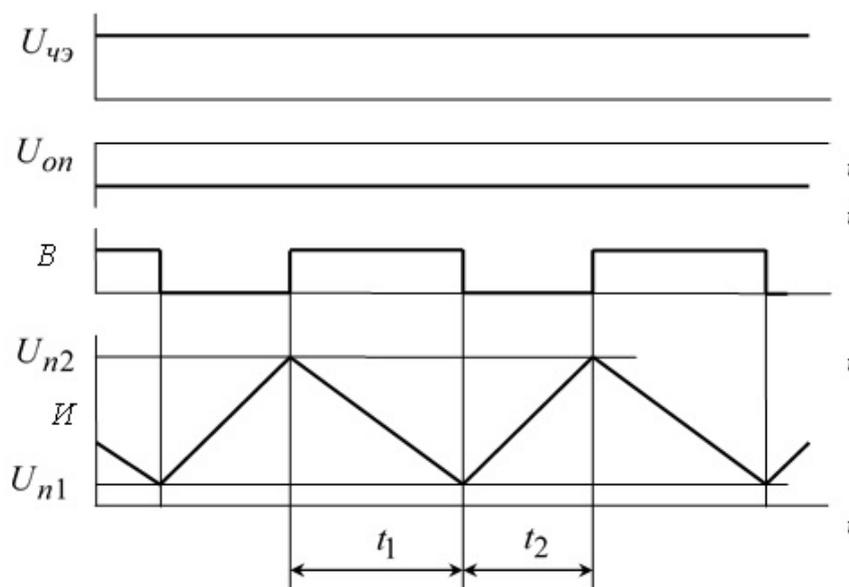


Рис. 2. Циклограмма сигналов датчика температуры:

$U_{чз}$ – напряжение на выводе 10 термочувствительного элемента 3; $U_{оп}$ – напряжение на выводе 18 источника опорного напряжения 4; B – напряжение на выводе 24 триггера Шмитта 8; I – напряжение на выводе 22 интегратора 7

Пусть на выходе 22 интегратора 7 (обозначено I на рис. 1, 2) присутствует напряжение, соответствующее сигналу логической «1» на выходе 24 (обозначено B на рис. 1, 2) и сигналу логического «0» на инверсном выходе 26 триггера Шмитта 8. Сигналы с выходов 24, 26 триггера Шмитта 8, поступая на управляющие входы 25, 27 ключей 5, 6, открывают ключ 5 и закрывают ключ 6. При этом напряжение $U_{чз}$ с выхода 10 термочувствительного элемента 3 через ключ 5 поступает на первый вход 13 интегратора 7. Напряжение на выходе 22 (циклограмма I рис. 2) интегратора уменьшается. Когда это напряжение достигнет нижнего порога

$U_{п1}$ срабатывания триггера Шмитта 8, он переключается и сигналы на его выходах 24 (циклограмма *B* рис. 2) и 26 изменяются на противоположные, что приводит к закрытию ключа 5 и открытию ключа 6. Подача напряжения $U_{чз}$ на первый вход 13 интегратора 7 прекращается. Ко второму входу 21 интегратора 7 через замкнутый ключ 6 подключается опорное напряжение $U_{оп}$. Полярность опорного напряжения относительно общей шины противоположна полярности напряжения чувствительного элемента. Напряжение на выходе 22 (циклограмма *И* рис. 2) интегратора увеличивается. Когда это напряжение достигнет верхнего порога переключения $U_{п2}$ триггера Шмитта 8, он вернется в исходное состояние. Далее процессы повторяются.

Напряжение $U_{чз}$ на выводах 10, 14 чувствительного элемента 3 зависит от температуры в соответствии с зависимостью

$$U_{чз} = U_{см} + \alpha T,$$

где $U_{см}$ – напряжение смещения характеристики термочувствительного элемента, соответствующее выходному напряжению термочувствительного элемента при нулевой температуре; T – измеряемая температура; α – температурный коэффициент термочувствительного элемента.

Если температура измеряется в градусах Кельвина и в качестве чувствительного элемента взята микросхема К1019ЧЕ2ХС [7], то $U_{см} = 0$.

Измеряемая температура равна

$$T = \frac{U_{чз}}{\alpha} - \frac{U_{см}}{\alpha}.$$

Значение $\frac{U_{см}}{\alpha}$ соответствует температуре смещения $T_{см}$ характеристики термочувствительного элемента, т.е.

$$T_{см} = \frac{U_{см}}{\alpha}.$$

Используя это, выражение для измеряемой температуры примет вид

$$T = \frac{U_{чз}}{\alpha} - T_{см}.$$

Интегрирование напряжения $U_{чз}$ чувствительного элемента 3 с его вывода 10 описывается выражениями

$$U_{п1} = U_{п2} - \frac{1}{\tau_1} \int_0^{t_1} U_{чз} dt, \quad U_{п2} - U_{п1} = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{t_1} U_{чз} dt = \frac{U_{чз} t_1}{\tau_1},$$

где τ_1 – постоянная интегрирования интегратора 7 по первому входу 13; t_1 – время интегрирования выходного напряжения чувствительного элемента, равное длительности сигнала логической «1» на выходе 24 триггера 8.

При интегрировании напряжения $U_{оп}$ с вывода 18 источника опорного напряжения 4 выходное напряжение интегратора 7 определяется выражением

$$U_{п2} = U_{п1} + \frac{1}{\tau_2} \int_0^{t_2} U_{оп} dt, \quad U_{п2} - U_{п1} = \frac{1}{\tau_2} \int_0^{t_2} U_{оп} dt = \frac{U_{оп} t_2}{\tau_2},$$

где τ_2 – постоянная интегрирования интегратора 7 по второму входу 21; t_2 – время интегрирования выходного напряжения источника опорного напряжения, равное длительности сигнала логического «0» на выходе 24 триггера 8.

Тогда $\frac{U_{\text{чз}} t_1}{\tau_1} = \frac{U_{\text{оп}} t_2}{\tau_2}$, откуда $U_{\text{чз}} = U_{\text{оп}} \frac{\tau_1 t_2}{\tau_2 t_1}$.

Подставляя полученное значение в выражение для измеряемой температуры, имеем

$$T = \frac{U_{\text{оп}} \tau_1 t_2}{\alpha \tau_2 t_1} - T_{\text{см}}.$$

Измеряемая температура определяется отношением длительностей логических «0» и «1» выходного сигнала триггера Шмитта δ .

В качестве токозадающих цепей 1, 2 могут быть использованы резисторы или стабилизаторы тока. В частности, построение токозадающих цепей на стабилизаторах тока показано на схеме рис. 1. Токозадающая цепь 1 построена на транзисторах $VT1$, $VT2$ и резисторах $R1$, $R2$, а токозадающая цепь 2 на транзисторах $VT3$, $VT4$ и резисторах $R3$, $R4$.

Интегратор 7 может быть построен на операционном усилителе DA , резисторах $R5$, $R6$ и конденсаторе C . Это показано на рис. 1. В этом случае

$$\tau_1 = R5 \cdot C, \quad \tau_2 = R6 \cdot C.$$

Отношение $\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{R5}{R6}$ от емкости конденсатора C интегратора не зависит, что показывает

на отсутствие влияния нестабильности емкости конденсатора C интегратора 7 на точность измерения температуры.

Как видно из приведенного выражения для температуры, результаты измерения температуры также не зависят и от пороговых напряжений $U_{\text{п1}}$, $U_{\text{п2}}$ триггера Шмитта δ и, следовательно, их нестабильность не вызывает погрешности измерения.

Отсутствие влияния нестабильности пороговых напряжений триггера Шмитта и емкости интегратора обеспечивает высокую точность измерений.

Значение $\frac{U_{\text{оп}} \tau_1}{\alpha \tau_2}$ определяется параметрами схемы датчика и является масштабным коэффициентом P :

$$P = \frac{U_{\text{оп}} \tau_1}{\alpha \tau_2}.$$

Тогда

$$T = P \frac{t_2}{t_1} - T_{\text{см}}.$$

При представлении результатов измерения в градусах Кельвина $T_{\text{см}} (^{\circ}K)$ и $U_{\text{см}} = 0$, $T_{\text{см}} (^{\circ}K) = 0$, $T (^{\circ}K) = P \frac{t_2}{t_1}$.

В частном случае, при $U_{\text{см}} \neq 0$, значение опорного напряжения может быть взято равным $U_{\text{оп}} = U_{\text{см}} \frac{\tau_2}{\tau_1}$. Тогда $K = \frac{U_{\text{см}}}{\alpha} = T_{\text{см}}$ и выражение для измеряемой температуры примет вид

$$T = T_{\text{см}} \left(\frac{t_2}{t_1} - 1 \right).$$

Если результат измерения необходимо представить в градусах Цельсия $T ^{\circ}C$, а в качестве термочувствительного элемента используется микросхема 1019ЧТ2АС, у которой $T_{\text{см}} = 273 ^{\circ}C$, то значение измеренной температуры определяется выражением

$$T \text{ } ^\circ\text{C} = 273 \left(\frac{t_2}{t_1} - 1 \right).$$

Информация об измеренном значении температуры подается на микроконтроллер АИУС, который осуществляет измерение длительностей логических «0» и «1» выходных импульсов датчика и осуществляет вычисление температуры по приведенной формуле.

Чувствительный элемент датчика может быть выносным и закрепляется непосредственно в точке, температура которой подлежит измерению.

На рис. 3 приведены гистограммы распределения абсолютной погрешности d измерения температуры датчиком, выпускаемым АО «Восход» – КРЛЗ, для трех температур: нормальной, 50 °С и минус 50 °С.

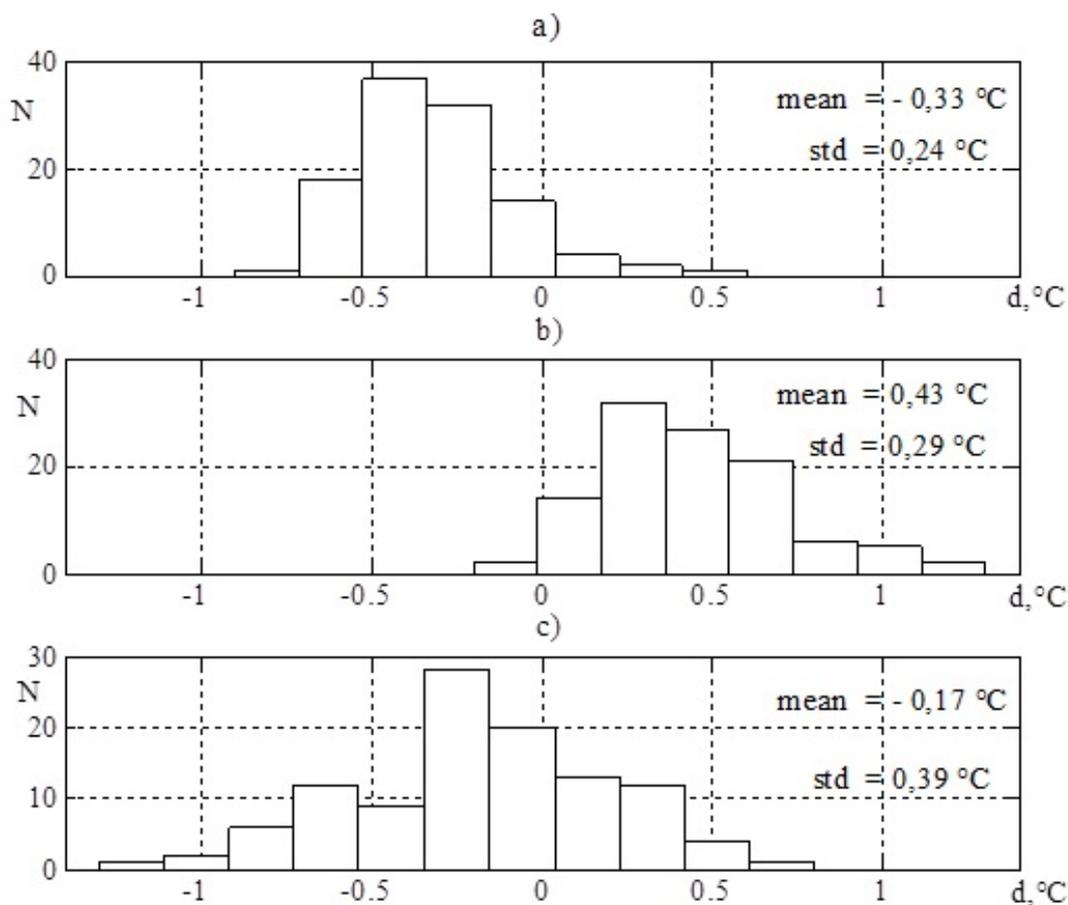


Рис. 3. Гистограмма погрешности d измерения температуры:
 а – нормальная температура; б – температура 50 °С; с – температура минус 50 °С

Гистограммы построены по результатам 100 измерений.
 Результирующие параметры измерений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результирующие параметры измерений датчика производства АО «Восход» – КРЛЗ

Измеряемая температура, °С	Предельные значения погрешности измерения, d , °С	Математическое ожидание погрешности измерения, mean, °С	Среднеквадратическое значение погрешности измерения, std , °С
20	-0,8; 0,6	-0,33	0,24
50	-0,2; 0,8	0,43	0,29
-50	-1,6; 0,7	-0,17	0,39

Из данных гистограммы рис. 3 и табл. 1 следует, что погрешность измерения температуры датчиком производства АО «Восход» – КРЛЗ в диапазоне температур ± 50 °С лежит в пределах $-1,6...0,8$ °С, математическое ожидание погрешности лежит в пределах $-0,33...0,43$ °С, среднеквадратическое значение погрешности не превышает 0,39 °С.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность применения для АИУС систем датчика температур, включающего в свой состав полупроводниковый термочувствительный элемент и времяимпульсный АЦП двойного интегрирования с фиксированными значениями пределов интегрирования. Высокая точность датчика температур обусловлена отсутствием влияний нестабильности компараторов АЦП, определяющих пределы интегрирования, а также емкости конденсатора интегратора.

Упрощение датчика и его высокая точность определяются заменой времяимпульсного АЦП двойного интегрирования с интегрированием входного сигнала в течение фиксированного времени на АЦП с интегрированием в фиксированных пределах. Это дало возможность исключить из состава датчика формирователь временного интервала.

Дальнейшее повышение точности измерения температуры возможно внесением в энергонезависимую память данных микроконтроллера АИУС индивидуальных параметров датчика температур, в частности, температуры смещения $T_{см}$ и масштабного коэффициента P . В этом случае вполне реальным будет снижение погрешности измерений до $\pm 0,5$ °С.

Возможно также введение дополнительной калибровки путем подключения к АЦП источника с эталонным напряжением, равным выходному напряжению термочувствительного элемента при какой-то фиксированной температуре, например минус 50 °С. Включая попеременно калибровку и измерение, по полученным значениям отношений длительностей логического «0» и «1» можно определить значение температуры с уточненным при калибровке температурным коэффициентом термочувствительного элемента α и масштабного коэффициента P .

Список литературы

1. Гуров С. В. Реактивные системы залпового огня / под общ. ред. акад. РАН, д.т.н., проф. А. Н. Макаровца. Тула : Пересвет, 2006. 432 с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М., 2020. 592 с. URL: <https://www.elec.ru/library/info/frajden-sovremennye-datchiki>
3. Датчики : справ. пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. М. : Техносфера, 2012. 624 с.
4. Гордов А. Н. Основы температурных измерений. М. : Энергоатомиздат, 1992. 304 с.
5. Резонатор кварцевый термочувствительный. РКТ206 ТУ25-1862.0013-88. URL: <http://sktbelpa.ru/ru/products/termo/49-rkt.html>
6. Precision temperature sensors. LM135-LM235-LM335. 2008. 16 с. URL: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/lm335.pdf>
7. Чувствительный элемент датчика температуры с выходным напряжением, соответствующим абсолютной температуре в Кельвинах. Микросхемы интегральные К1019ЧЕ2АС, К1019ЧЕ2БС, К1019ЧЕ2ВС. Технические условия АДБК.431320.793 ТУ. АО «Восход» – КРЛЗ. 2010. 35 с.
8. Никамин В. А. Аналого-цифровые преобразователи : справочник. СПб. : КОРОНА принт ; М. : Альтекс-А, 2012. 224 с.

References

1. Gurov S.V. *Reaktivnye sistemy zalpovogo ognya = Multiple launch rocket systems*. Tula: Peresvet, 2006: 432. (In Russ.)
2. Frayden Dzh. *Sovremennye datchiki. Spravochnik = Modern sensors. Handbook*. Moscow, 2020:592. (In Russ.). Available at: <https://www.elec.ru/library/info/frajden-sovremennye-datchiki>
3. Sharapov V.M., Polishchuk E.S. (eds.). *Datchiki: sprav. posobie = Sensors : a reference manual*. Moscow: Tekhnosfera, 2012:624. (In Russ.)
4. Gordov A.N. *Osnovy temperaturnykh izmereniy = Fundamentals of temperature measurements*. Moscow: Energoatomizdat, 1992:304. (In Russ.)
5. Quartz thermosensitive resonator. RCT206 TU25-1862.0013-88. (In Russ.). Available at: <http://sktbelpa.ru/ru/products/termo/49-rkt.html>
6. *Precision temperature sensors. LM135-LM235-LM335*. 2008:16. (In Russ.). Available at: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/lm335.pdf>

7. A temperature sensor sensor with an output voltage corresponding to the absolute temperature in Kelvins. Integrated circuits K1019CHE2AS, K1019CHE2BS, K1019CHE2VS. Technical conditions of ADBC.431320.793 TU. JSC "Voskhod" – KRLZ. 2010:35. (In Russ.)
8. Nikamin V.A. *Analogo-tsifrovye preobrazovateli: spravochnik = Analog-to-digital converters : a handbook*. Saint Petersburg: KORONA print; Moscow: Al'teks-A, 2012:224. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Вячеславович Захаров

начальник отдела,
АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод
(Россия, г. Калуга, Грабцевское шоссе, 43)
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

Anton V. Zakharov

Head of department,
JSC "Voskhod" – Kaluga Radio Tube Plant
(43 Grabtsevskoe highway, Kaluga, Russia)

Илья Владимирович Либкинд

технический директор
АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод
(Россия, г. Калуга, Грабцевское шоссе, 43)
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

Ilya V. Libkind

Technical director,
JSC "Voskhod" – Kaluga Radio Tube Plant
(43 Grabtsevskoe highway, Kaluga, Russia)

Леонид Ефимович Шахмейстер

доктор технических наук,
начальник СКБ,
АО «НПО «Луч»
(Россия, г. Новосибирск, Станционная ул., 32)
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

Leonid E. Shakhmeister

Doctor of technical sciences,
head of the SKB,
JSC "NPO "Luch"
(32 Stantsionnaya street, Novosibirsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021