

МЕТОДИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ТОЧНОСТТА ПРИ ИЗМЕРВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРА СЪС ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ТЕРМОРЕЗИСТОРИ

Илиян Господинов*, Цанко Караджов

*Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, ул. „Хаджи Димитър” 4
Кореспондиращ автор: gospodinov@tugab.bg*

METHODS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF TEMPERATURE MEASUREMENT USING SEMICONDUCTOR THERMISTORS

Illyan Gospodinov*, Tsanko Kardzhov

*Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, 4 Hadzi Dimitar,
Corresponding author: gospodinov@tugab.bg*

Abstract

This paper presents the development of a method for improving the accuracy of temperature measurement using a thermoresistive sensor. Thermistors are widely used semiconductor components that serve as temperature sensors. However, various parasitic factors—such as noise interference, hysteresis, and inherent nonlinearity—introduce significant measurement inaccuracies. The proposed method combines hardware calibration of the thermoresistive sensor with software-based correction of the measured data. Specifically, the approach involves error estimation and compensation through an exponential equation with three constants, determined via three-point calibration of the sensor. The results demonstrate that integrating hardware calibration with software corrections leads to a substantial improvement in measurement accuracy.

Keywords: Thermistor sensor, Accuracy, Temperature measurement, Semiconductor

ВЪВЕДЕНИЕ

Разработването и проектирането на все по-нови методи и устройства за измерване на температура се налага от масовото използване на такива устройства в нашето съвремие, както в бита, така и в индустрията. Повишената точност и функционалност, както и намаляването на цената на тези устройства, са в основата на съвременните изисквания към устройствата от този род.

Съществен фактор за всяко такова устройство е неговата точност, докато в бита, точността на измерваната температура не е от съществено значение, то в индустрия-

та дори малки колебания в температурата, предизвикани от неточност в измерването, могат да доведат до грешки в производствените процеси. Строгий температурен контрол е задължителна част от почти всяка промишлена верига, като се започне от хранителната промишленост и здравеопазването до производството на електронни елементи, като в здравеопазването дори малки отклонения са ключови за правилното поставяне на диагноза [1]. От правилното измерване на температурата зависи стриктното спазване на технологичните норми на производството и пряко влияе върху качеството на произвежданите продукти.

ИЗЛОЖЕНИЕ

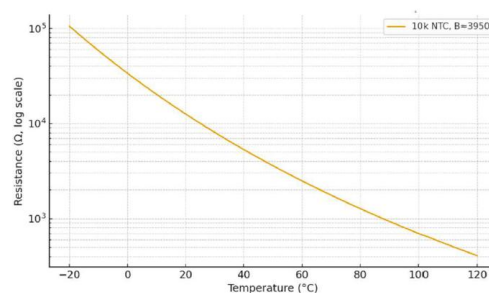
Измерването на температура с терморезистивен сензор има редица важни предимства. Сензорите от този тип са много чувствителни на малки изменения, което позволява използването им за мониторинг както в индустрията, така и в ежедневието. Полупроводниковите терморезистивни сензори имат кратко време за реакция и малка маса на термочувствителния слой, което гарантира че измерените стойности следват реалните температурни изменения [2]. Други предимства са тяхната ниска себестойност и малки размери, което ги прави подходящи за интегриране в различни измервателни системи (фиг.1).



Фиг.1. Полупроводников терморезистор

Основен недостатък на тези сензори се явява това, че освен че имат нелинейна характеристика (фиг. 2), не могат да бъдат направени два еднакви сензора с еднакви параметри и характеристики.

В статията е разработен метод за измерване на температура чрез виртуален инструмент и софтуерен алгоритъм, чрез който се изчисляват коефициентите A , B и C , които участват в предавателната характеристика на терморезистора.



Фиг.2. Характеристики на NTC терморезистор [4]

Параметърът B (наричан още Beta constant или материална константа) е характеристика на NTC терморезистора, която описва как се променя съпротивлението му при увеличаване на температурата [10].

Математически връзката е:

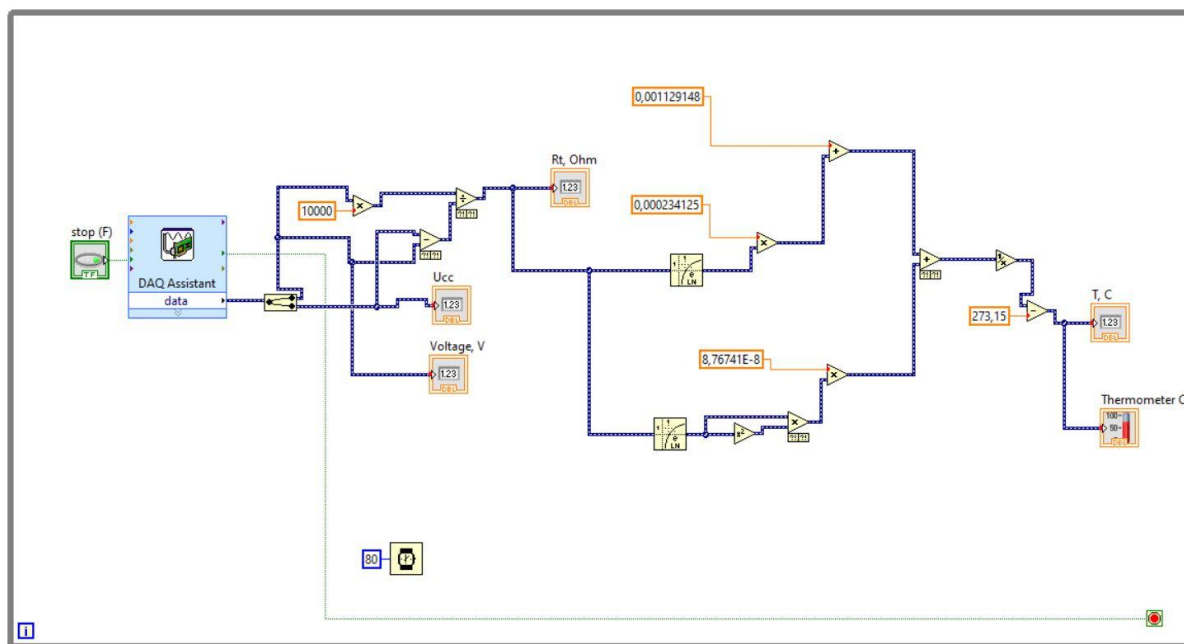
$$R(T) = R_0 \cdot \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1)$$

където:

$R(T)$ е съпротивлението при температура T в Келвин,

R_0 е номиналното съпротивление при референтна температура T_0 обикновено 25 °C.

В основата на разработвания метод е създаване на виртуален инструмент (фиг. 3), който измерва температура чрез NTC сензор 10 K Ω , включен към DAQ система за събиране на данни [3]. Терморезистивният сензор е свързан във веригата като делител на напрежение с прецизен резистор със стойност $R_{ref} = 10$ K Ω , което е съпротивлението на терморезистора при 25 °C. Захранващо напрежение $V_S = 5$ V [10]. Измерва се напрежението в средната точка на делителя V_{node} . В DAQ Assistant измервателната системата за събиране на данни напрежението се подава на извод, който е конфигуриран като 14 битов аналогов вход и измерва напрежение с висока точност [7]. От измереното напрежение по нататък се изчислява



Фиг.3. Блокова схема

съпротивлението R_t на терморезистора по формулата

$$R_t = R_{ref} \frac{V_{node}}{V_s - V_{node}} \quad (2)$$

Температурата се определя чрез решаване на уравнението на Steinhart–Hart (съпротивление-температура):

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R_t) + C [\ln(R_t)]^3, T[K] \quad (3)$$

Трите коефициента A , B и C са константи, дадени от производителя на терморезистора за серия от терморезистори, а не за конкретния сензор.

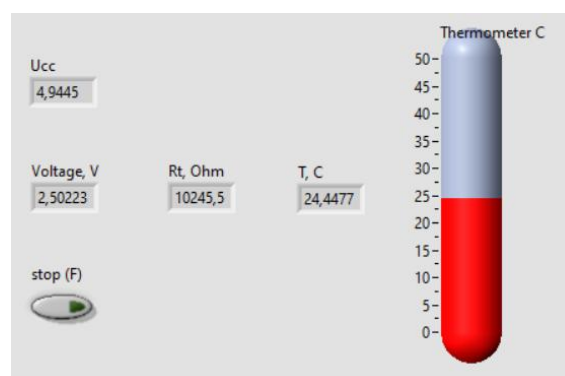
$$\begin{aligned} A &= 0,001129148; \\ B &= 0.000234125; \\ C &= 8.76741 \times 10^{-8}. \end{aligned}$$

LN блока изчислява $x = \ln(R_t)$. Горният клон умножава $x \cdot B$ и добавя A . Долният клон повдига x^3 и умножава по C . Резултатите от двата клона се сумират.

$$S = A + Bx + Cx^3 \quad (4)$$

Блокът ТК изчислява реципрочната стойност $\frac{1}{S}$, а полученият резултат е температура в Келвин $T[K]$.

Предният панел съдържа интерфейс за наблюдение на температурните измервания в реално време (фиг. 4).



Фиг.4. Фронт панел

Разработваният метод включва софтуерно приложение, което автоматизира процеса на изчисляване на трите константи A , B и C , за всяка от трите калибрационни точки R_t и T_t за конкретен температурен сензор.

Алгоритъмът на приложението е линеен. Изпълнението на програмата започва с въвеждане на данни от потребителя, за температурата T и съпротивлението R в трите калибрационни точки [8].

В следващия блок се изчислява стойностите на двойките x_1 и y_1 , x_2 и y_2 и x_3 и y_3 . Като се положи, че $x = \ln(R)$ а $y = \frac{1}{T}$.

В третия изчислителен блок, за всяка от измерените точки (R_x, T_x) с вече пресметнатите стойности за x и y , формираме 3 уравнения от типа

$$y = A + Bx + Cx^3 \quad (5)$$

Съставената система от 3 уравнения представлява формираната матрица Δ , ΔA , ΔB , и ΔC се пресмятат по метода на Крамер [10].

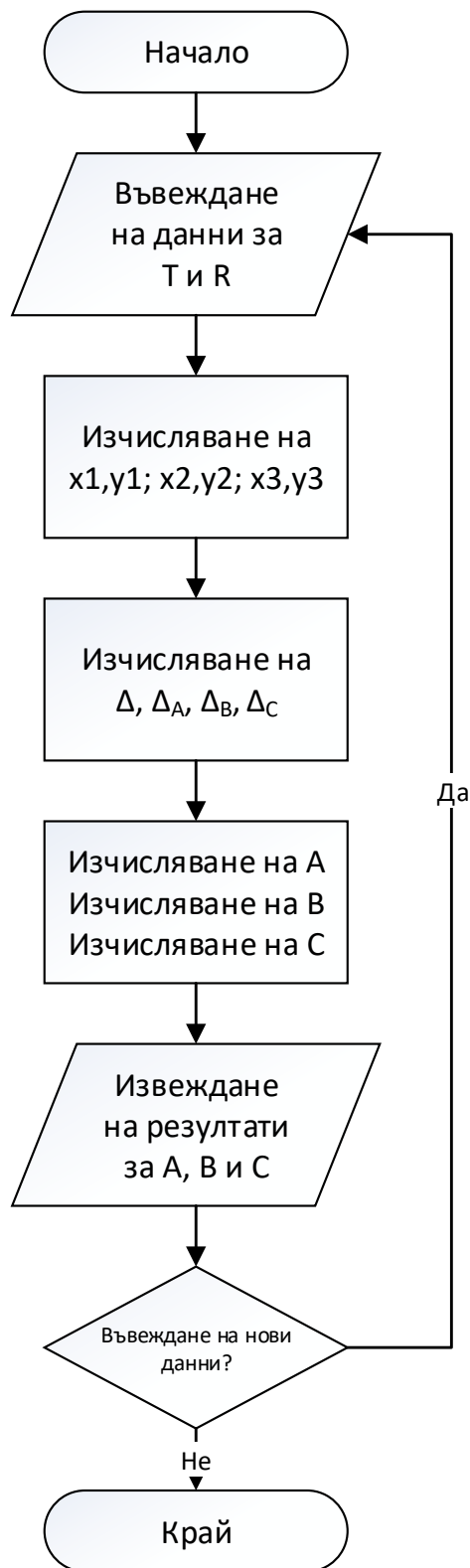
В следващия етап се изчисляват резултатите за A , B и C .

$$A = \frac{\Delta_A}{\Delta}, B = \frac{\Delta_B}{\Delta}, C = \frac{\Delta_C}{\Delta} \quad (6)$$

На следващия етап получените резултати за A , B и C се извеждат към потребителя [9].

Последният функционален блок всъщност инициира нов цикъл от изчисления с нови данни за точките (R_x, T_x) по желание на потребителя или програмата приключва своето действие.

Фиг.5. Потребителски интерфейс



Фиг.6. Алгоритъм на приложението

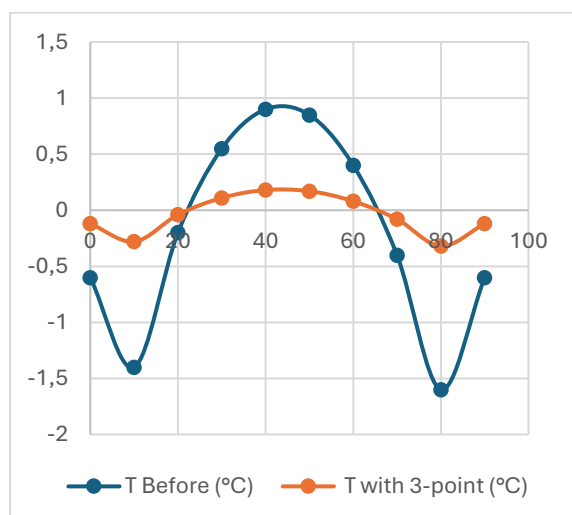
Приложението е реализирано на C#, компилирано с .NET 8.0 x64. Самото приложение е лесно и интуитивно за работа поради winform GUI. Данни се валидират още на входа с цел избягване на потребителски грешки.

Резултати от измерването и проведената софтуерна корекция

Таблица 1. Експериментални резултати

True T (°C)	T (°C) with 3-point	ΔT (°C) Before	ΔT (°C) with 3-point
0	-0,12	-0,6	-0,12
10	9,72	-1,4	-0,28
20	19,96	-0,2	-0,04
30	30,11	0,55	0,11
40	40,18	0,9	0,18
50	50,17	0,85	0,17
60	60,08	0,4	0,08
70	69,92	-0,4	-0,08
80	79,68	-1,6	-0,32
90	89,88	-0,6	-0,12

На фиг. 6 е показано графично изменението на абсолютната грешка преди и след калибрирането в почти целия температурен диапазон на измерване.



Фиг. 7. Графично съпоставяне на резултатите преди и след калибрирането

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коригираните резултати показват повишаване на точността на измерената температура. Калибрирането в три точки подsigурява намаляване на грешката в целия измервателен диапазон [5-6]. Разработеното софтуерно приложение автоматизира изчислителния процес като така се намалява възможността за допускане на неволни грешки по време на пресмятанията. Хардуерното триточково калибриране в комбинация със софтуерна корекция на резултатите, на практика определят коефициентите *A*, *B* и *C* за конкретния терморезистор, които са различни от тези, дадени от производителя, което води до повишаване на точността при измерване на температура с такъв вид сензор.

Благодарности: Това изследване е финансирано от научноизследователски проект № НИП2025-19 за научни изследвания, финансирани от държавния бюджет – 2025 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 5th ed. Springer, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-19303-8.
- [2] A. S. Morris and R. Langari, Measurement and Instrumentation: Theory and Application, 2nd ed. Academic Press, 2015.
- [3] National Instruments, NI-DAQmx Concepts Manual, Austin, TX: NI, 2019. [Online]. Available: <https://www.ni.com>
- [4] J. S. Steinhart and S. R. Hart, "Calibration curves for thermistors," Deep-Sea Res. Oceanogr. Abstr., vol. 15, no. 4, pp. 497–503, 1968. doi: 10.1016/0011-7471(68)90057-0.
- [5] M. Grossi and M. Omaña, "Accuracy of NTC thermistor measurements using the sensor to microcontroller direct interface," Eng. Proc., vol. 82, no. 1, p. 12, 2024. doi: 10.3390/ecsa-11-20527.

- [6] M. Petkovšek, M. Nemec, and P. Zajec, "Algorithm execution time and accuracy of NTC thermistor-based temperature measurements in timecritical applications," *Mathematics*, vol. 9, no. 18, p. 2266, 2021. doi: 10.3390/math9182266.
- [7] Z. Liu et al., "Design of temperature measurement system based on thermal dissipation coefficient of NTC thermistor," SSRN, 2024. doi: 10.2139/ssrn.4748230.
- [8] G. Liu, "Evaluation of different calibration equations for NTC thermistors: Accuracy assessment," *Sens. Actuators A Phys.*, 2018. doi: 10.1016/j.sna.2018.03.009.
- [9] Z. Zhang, S. Lin, K. Cao, and Z. Liu, "Method for improving temperature measurement accuracy of NTC thermistors based on multisegment linear regression," *J. Electron. Inf. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 127–134, 2025. doi: 10.23977/jeis.2025.100117.
- [10] Karadzhov, T., Dichev, D., Zhelezarov, I., Georgiev, B., Pulov, D., Drumev, K. Improving the Accuracy of Temperature Measurement with Thermoresistive Sensors. In *2025 XXXV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. IEEE.