International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

ПОДОБРЯВАНЕ НА ТОЧНОСТТА ПРИ ИЗМЕРВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРА С ПЛАТИНЕНИ РЕЗИСТИВНИ СЕНЗОРИ

Илиян Господинов

ТУ Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България
**кореспондиращ автор: gospodinov@tugab.bg*

Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

IMPROVING THE ACCURACY OF TEMPERATURE MEASUREMENT USING PLATINUM RESISTANCE SENSORS

Iliyan Gospodinov

TU Gabrovo, 4 H. Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: gospodinov@tugab.bg*

Center of competence "Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies"

Abstract
This study presents experimental results from the calibration and comparative analysis of PT100 and PT1000 platinum resistance sensors. The study was carried out by measuring the resistance of the two sensors at specific temperature points determined using a reference thermometer. The main metrological characteristics of the two sensors were analysed. The comparison carried out enables an assessment of the advantages and disadvantages of the two sensors.

Keywords: RTD sensors, PT_{100}, PT_{1000}, temperature measurement.

ВЪВЕДЕНИЕ

Температурата е най-често измерваната величина, а точността на нейното измерване влияе пряко върху качеството на всеки един процес, ето защо използването на точни температурни сензори е важно както в индустриалните технологични процеси, така и в научните изследвания.

Един от най-използваните методи за измерване на температура е изследването на зависимостта между електрическото съпротивление на метала и температурата. Повишаването на температурата на метала води до повишаването на неговото електрическо съпротивление, което позволява чрез промяна в електрическото съпротивление на метала да се съди за изменението на измерваната температура [1].

Сензорите, използващи това явление, се наричат Resistance Temperature Detectors – RTD. Един от най-използваните метали за изработка на такива датчици е платината /Pt/. Платината притежава висока химическа устойчивост, висока температура на топене и почти линейна зависимост на изменение на електрическото си съпротивление под влияние на температурата, което я прави много подходяща за изработката на високоточни RTD датчици [2].

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

Едни от най-известните датчици за измерване на температура, базирани на платина, са PT100 и PT1000. Тези модели се характеризират с висока чувствителност, дълговременна стабилност и отлична повторяемост.

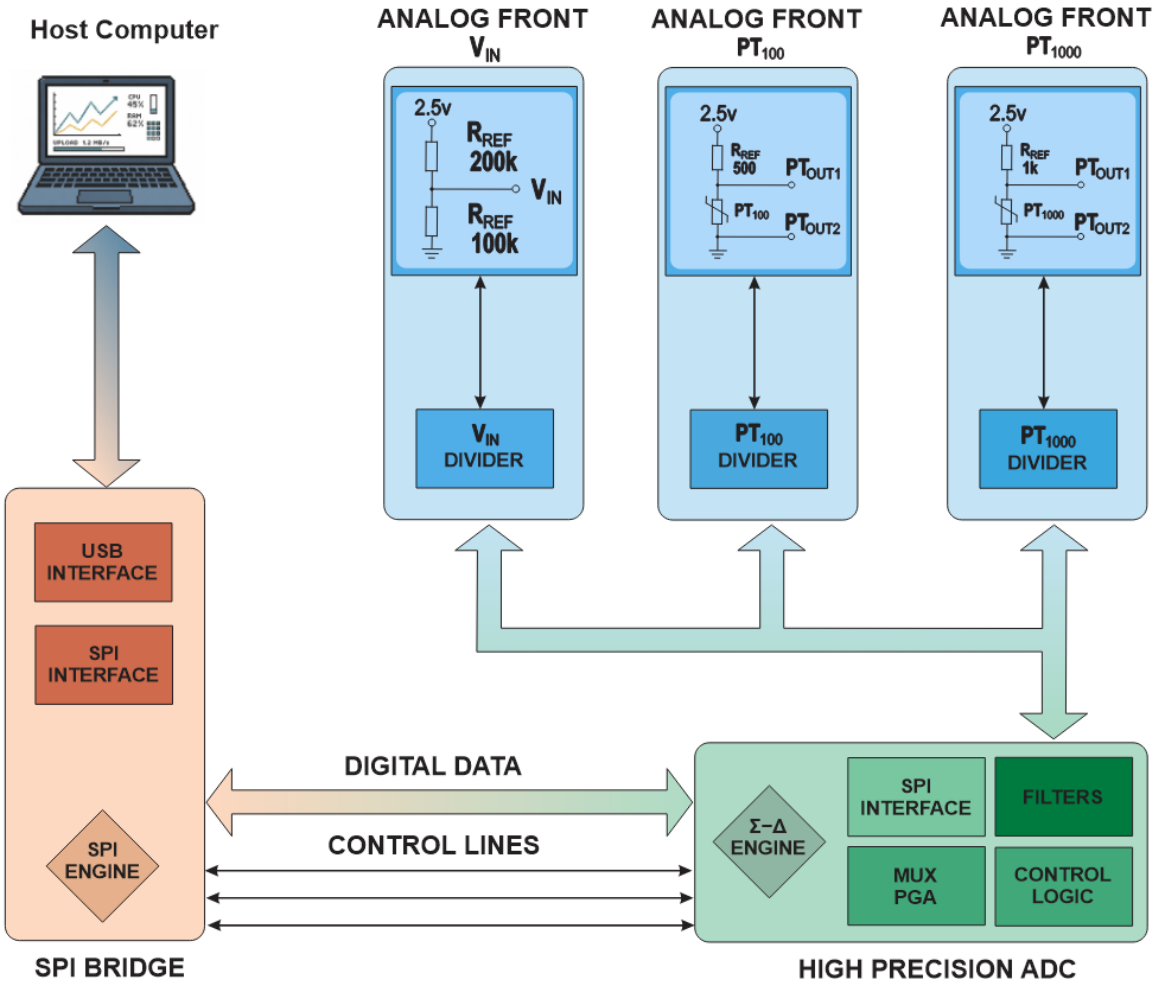
ИЗЛОЖЕНИЕ

Опитната постановка използва платинени резистивни температурни сензори /RTD/ PT100 и PT1000. В ролята на еталонен термометър беше използван живачен термометър с деление на скалата 0,1 °C. Двата сензора и живачният термометър бяха поставени в съд със флуид.

Самото измерване беше извършено чрез специално разработената за изследването измервателна система, чиято структура е представена на Фиг. 2. Основните функционални блокове на системата включват 3 аналогови входа, по един за всеки



Фиг. 1. *Лабораторна установка за постепенно нагряване с помощта на магнитна бъркалка*



Фиг. 2. *Измервателна система*

от изследваните датчици PT100 и PT1000 и един за измерване на захранващото напрежение.

И трите аналогови входа са реализирани като отделни резистивни делители на напрежение с високоточни резистори с допуск ±0,01 %. Напреженията от всеки делител се подават към аналогов вход на ADC, където се измерват, конвертират в цифров вид и се предават по шината за данни към софтуера за обработка и регистрация [3].

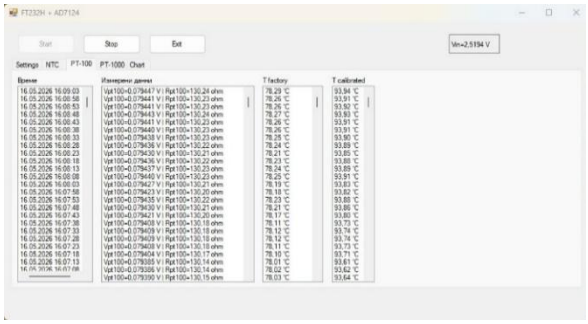
Аналоговият вход за PT100 е реализиран като резистивен делител на напрежение с високоточен резистор 500 Ω. При стабилизирано захранващо напрежение от 2,50 V токът, протичащ през сензора, е 4,17 mA, откъдето следва, че мощността, разсейвана в сензора, е 1,74 mW.

Аналоговият вход за PT1000 е реализиран като резистивен делител на напрежение с високоточен резистор 1 kΩ. При стабилизирано захранващо напрежение от 2,50 V токът, протичащ през сензора, е 1,25 mA, откъдето следва, че мощността, разсейвана в сензора, е 1,56 mW.

Аналоговият вход за измерване на захранващото напрежение е реализиран като резистивен делител на напрежение с два високоточни резистора 200 kΩ и 100 kΩ, което намалява захранващото напрежение три пъти, а измерената от ADC стойност програмно се умножава по 3. Стойността на напрежението се заснема за всяко измерване на показателите на датчиците и се използва пряко при изчислението на температурата.

В ролята на ADC /Analog-to-Digital Converter/ се използва високоточен 24-битов „sigma-delta“ преобразувател, осигуряващ висока разделителна способност, ниско ниво на шум и прецизно дигитализиране на сигналите от температурните сензори.

Системата включва SPI интерфейс, който осигурява обмен на данни и командни сигнали с хост компютъра и хост компютър, на който е разположен специално разработеният за изследването регистриращ софтуер (Фиг. 3).



Фиг. 3. *Регистриращ софтуер*

Алгоритъмът на програмното приложение е представен на Фиг. 4, той започва със установяване на комуникацията между интерфейсния модул SPI модула и хост компютъра,

Следващата стъпка е установяване на комуникация между SPI модула и АЦП.

При успешна инициализация на тези два модула се преминава към четене на данни от АЦП и предаването им за последваща обработка към хост компютъра.

Получените данни се обработват от разработения регистриращ софтуерен продукт и се извеждат в интерфейса на приложението.

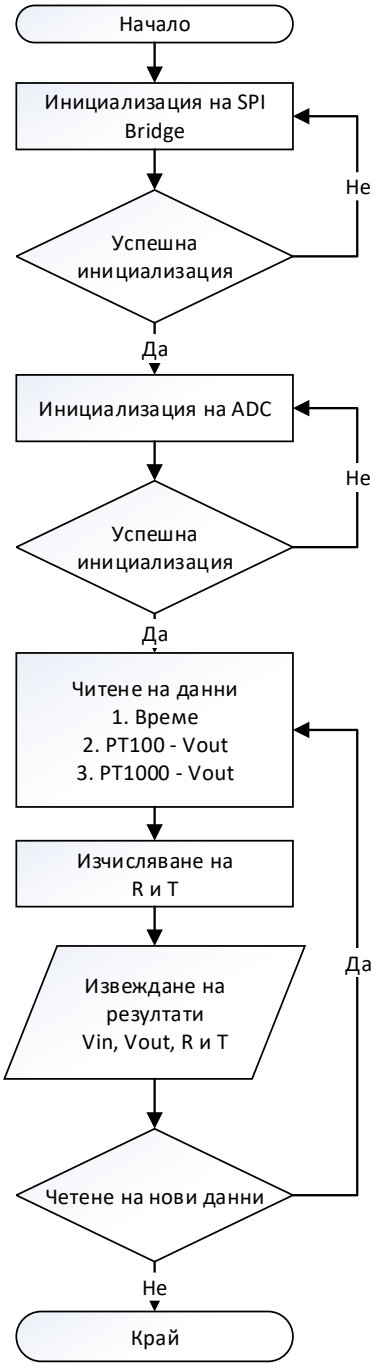
При продължаване на измерването алгоритъмът се връща към прочитането на нови данни, а при прекратяване се достига до края.

Измервателният цикъл се изпълнява през интервал от 5 секунди.

В ролята на работен флуид беше използвана дестилирана вода.

Изследването започна при температура 0 °C. Тази температура беше достигната чрез добавяне на ледени кубчета във водата в измервателния съд.

Стойностите на разсейваната в двата сензора мощност са малки, и отчитайки факта, че измерването се извършва във водна среда с постоянно хомогенизиране (Фиг. 1), характеризираща се с много добро топлоотдаване към работния флуид, то можем да приемем, че влиянието на самонагряването на сензора върху резултата от измерването ще бъде пренебрежимо малко [4].



Фиг. 4. *Алгоритъм на програмата*

В процеса на изследване бяха измерени стойностите на съпротивленията на двата платинени сензора PT100 и PT1000 в предварително избраните температурни точки съгласно показанията на живачния еталонен термометър.

Табл. 1: *Измерени стойности на съпротивленията за двата сензора.*

T, °C	R PT100, Ω	RPT1000, Ω
0,8	100,02	1000,11
5	101,21	1016,07
10	103,2	1035,42
15	105,08	1054,68
20	106,97	1073,8
25	108,99	1093,28
30	110,87	1112,21
35	112,86	1132,11
40	114,82	1151,32
45	116,69	1170,26
50	118,65	1190,35
55	120,55	1209,48
60	122,47	1228,74
65	124,37	1248,2
70	126,29	1267,41
75	128,23	1286,83
80	130,17	1305,6
85	132,05	1325,19

Температурата, измерена от двата сензора, беше изчислена като:

$$T_{pt100} = \frac{R_{pt100} - 100}{0.385} \quad (1)$$

$$T_{pt1000} = \frac{R_{pt1000} - 1000}{3{,}850} \quad (2)$$

където:

R е измереното съпротивление на сензора в съответната контролна точка;

100/1000 е съпротивлението в Ω на сензорите при температура 0 °C;

$\mathbf{0.385}\frac{\boldsymbol{\Omega}}{^{\circ}\mathrm{C}}$, $\mathbf{3.850}\frac{\boldsymbol{\Omega}}{^{\circ}\mathrm{C}}$ са чувствителностите съответно на PT100 и PT1000 в използваното линейно приближение при номинален температурен коефициент $\alpha = 0{,}00385$ $^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$ съгласно IEC 60751.

Табл. 2: *Изчислени температурни стойности*

T, °C	R_{PT100}, Ω	T_{PT100}, °C	R_{PT1000}, Ω	T_{PT1000}, °C
0,8	100,02	0,05	1000,11	0,03
5	101,21	3,14	1016,07	4,17
10	103,2	8,31	1035,42	9,20
15	105,08	13,19	1054,68	14,20
20	106,97	18,10	1073,8	19,17
25	108,99	23,35	1093,28	24,23
30	110,87	28,23	1112,21	29,15
35	112,86	33,40	1132,11	34,31
40	114,82	38,49	1151,32	39,30
45	116,69	43,35	1170,26	44,22
50	118,65	48,44	1190,35	49,44
55	120,55	53,38	1209,48	54,41
60	122,47	58,36	1228,74	59,41
65	124,37	63,30	1248,2	64,47
70	126,29	68,29	1267,41	69,46
75	128,23	73,32	1286,83	74,50
80	130,17	78,36	1305,6	79,38
85	132,05	83,25	1325,19	84,46

За всяка заснета точка беше определена абсолютната грешка като разлика между температурата на еталонния термометър и изчислената температура.

$$\Delta T = T_{ет.} - T_{PT} \qquad (3)$$

Табл. 3: *Стойности на грешката ΔT преди калибриране*

T, °C	ΔT_{PT100}, °C	ΔT_{PT1000}, °C
0,8	0,75	0,77
5	1,86	0,83
10	1,69	0,80
15	1,81	0,80
20	1,90	0,83
25	1,65	0,77
30	1,77	0,85
35	1,60	0,69
40	1,51	0,70
45	1,65	0,78
50	1,56	0,56
55	1,62	0,59
60	1,64	0,59
65	1,70	0,53
70	1,71	0,54
75	1,68	0,50
80	1,64	0,62
85	1,75	0,54

Получените стойности показват грешката на двата сензора преди калибриране.

За намаляване на систематичната грешка приложихме линейна регресия на температурата, отчетена от еталонния термометър, спрямо изчисленото съпротивление на сензора.

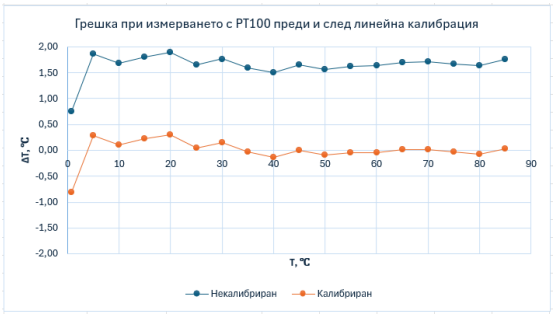


Фиг. 5. *Линейна калибрационна зависимост T(R) за температурния сензор PT100.*

$$T_{PT_{100}} = 2.6024846501 * R_{PT_{100}} - 258.6917079827 \qquad (4)$$

Табл. 4: *Измерени и изчислени стойности със сензор PT100.*

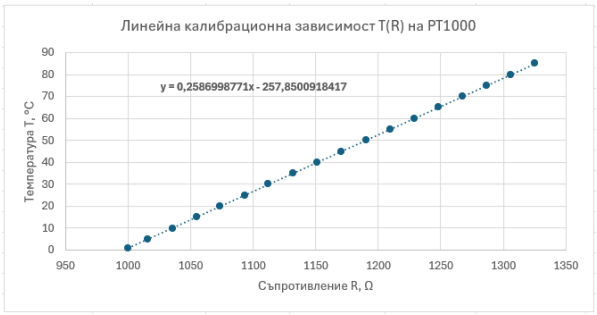
T, °C	T_{PT100}, °C	T_{PT100} кал, °C	ΔT_{PT100}, °C	ΔT_{PT100} кал, °C
0,8	0,05	1,61	0,75	-0,81
5	3,14	4,71	1,86	0,29
10	8,31	9,89	1,69	0,11
15	13,19	14,78	1,81	0,22
20	18,10	19,70	1,90	0,30
25	23,35	24,96	1,65	0,04
30	28,23	29,85	1,77	0,15
35	33,40	35,03	1,60	-0,03
40	38,49	40,13	1,51	-0,13
45	43,35	45,00	1,65	0,00
50	48,44	50,10	1,56	-0,10
55	53,38	55,04	1,62	-0,04
60	58,36	60,04	1,64	-0,04
65	63,30	64,98	1,70	0,02
70	68,29	69,98	1,71	0,02
75	73,32	75,03	1,68	-0,03
80	78,36	80,08	1,64	-0,08
85	83,25	84,97	1,75	0,03



Фиг. 6. *Грешка при измерване на температурата с PT100 преди и след линейна калибрация*

От фиг. 6 става видно, че преди калибриране измерването се характеризира със систематична грешка от около 1,7 °C. След прилагането на линейна калибрация систематичната грешка е почти неутрализирана, като остатъчните отклонения се концентрират близо до 0 °C.

Приложихме същата линейна регресия и върху резултатите, получени от сензора PT1000.

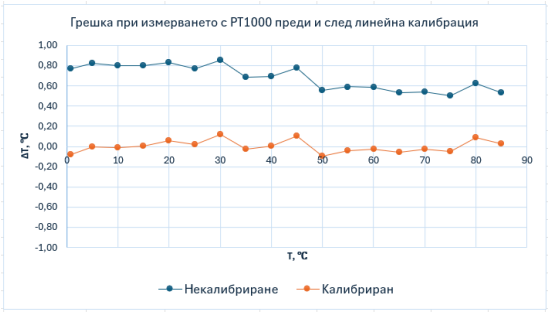


Фиг. 7. *Линейна калибрационна зависимост T(R) за температурния сензор* PT_{1000}.

$$T_{\mathrm{PT1000}} = 0{,}258699877 * R_{\mathrm{PT1000}} - 257{,}8500918417 \qquad (5)$$

Табл. 5: *Измерени и изчислени стойности със сензор PT1000.*

T, °C	T_{PT1000}, °C	T_{PT1000} кал, °C	ΔT_{PT1000}, °C	ΔT_{PT1000} кал, °C
0,8	0,03	0,88	0,77	-0,08
5	4,17	5,01	0,83	-0,01
10	9,20	10,01	0,80	-0,01
15	14,20	15,00	0,80	0,00
20	19,17	19,94	0,83	0,06
25	24,23	24,98	0,77	0,02
30	29,15	29,88	0,85	0,12
35	34,31	35,03	0,69	-0,03
40	39,30	40,00	0,70	0,00
45	44,22	44,90	0,78	0,10
50	49,44	50,09	0,56	-0,09
55	54,41	55,04	0,59	-0,04
60	59,41	60,02	0,59	-0,02
65	64,47	65,06	0,53	-0,06
70	69,46	70,03	0,54	-0,03
75	74,50	75,05	0,50	-0,05
80	79,38	79,91	0,62	0,09
85	84,46	84,98	0,54	0,02



Фиг. 8. *Грешка при измерване на температурата с PT1000 преди и след линейна калибрация.*

От фиг. 8 става видно, че преди калибриране измерването се характеризира със систематична грешка от около 0,8 °C, която леко намалява с увеличаване на температурата. След прилагането на линейна калибрация систематичната грешка е почти неутрализирана, като остатъчните отклонения се концентрират близо до 0 °C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеното изследване представлява анализ на платинени резистивни сензори PT100 и PT1000 при еднакви експериментални условия.

Получените резултати доказват, че и двата сензора могат да бъдат използвани за прецизно измерване на температурата, но само след предварително проведена подходяща калибрация [5].

При PT100 преди калибрирането се наблюдава систематична грешка около 1,7 °C, която остава почти постоянна в целия температурен диапазон на измерването.

При PT1000 систематичната грешка е по-ниска - около 0,8 °C, намаляваща с увеличаването на температурата.

След прилагането на линейна калибрация систематичната грешка и на двата сензора се свежда до леки отклонения около нулата.

Разработената измервателна система показа съществено предимство на сензора PT1000 поради по-голямото изменение на съпротивлението при промяна на температурата.

При PT100 чувствителността на сензора е 0,385 $\frac{\Omega}{^{\circ}C}$, докато при PT1000 тя е 3,85 $\frac{\Omega}{^{\circ}C}$.

При PT100 малките изменения на напрежението могат да бъдат съпоставими със шума и да увеличат неопределеността на изследването.

С конкретните стойности на реализираната измервателна система сензорът PT1000 осигурява 1,8 пъти по-голямо изменение на напрежението за 1°C в сравнение със сензора PT100.

По-голямото изменение на напрежението позволява по-точното му измерване, намалява относителното влияние на шума, което създава предпоставки за по-малка неопределеност на измерването.

Докладът се публикува във връзка с резултатите от изпълнение на дейностите по проект № НИП2026-16 „Изследване на алгоритъм за оценка на ориентация на движещи се обекти с използване на MEMS сензори и усъвършенстван Калман филтър“

БЛАГОДАРНОСТИ:

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

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] T. Karadzhov, D. Dichev, I. Zhelezarov, B. Georgiev, D. Pulov, and K. Drumev, “Improving the accuracy of temperature measurement with thermoresistive sensors,” in Proc. 2025 XXXV Int. Sci. Symp. Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2025, pp. 1–5, doi: 10.1109/MMA67107.2025.11311316.

[4] Z. Liu et al., “Design of temperature measurement system based on thermal dissipation coefficient of NTC thermistor,” SSRN, 2024. doi: 10.2139/ssrn.4748230.

[5] D. Dichev, H. Koev, D. Diakov, N. Panchev, R. Miteva, and H. Nikolova, “Automated system for calibrating instruments measuring parameters of moving objects,” in Proc. 2017 Int. Symp. ELMAR, Zadar, Croatia, 2017, pp. 219–224, doi: 10.23919/ELMAR.2017.8124472.