

УДК (004.021+004.4):536.531
DOI: 10.31891/2219-9365-2020-65-1-4

ЛАТЕНКО В. І., МИРОНОВ Р. Д., ОРНАТСЬКИЙ І. А.
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України
ЛОГВИНЕНКО Д. М.
ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»

АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ОПОРОМ РЕЗИСТИВНОГО ТЕРМОДАТЧИКА

Розроблено алгоритм ітераційного розв'язання у числовому вигляді рівняння Календара -Ван Дусена четвертого ступеня, що описує залежність електричного опору резистивного термодатчика Pt100 від температури в діапазоні мінусових температур. Наводиться лістинг програми на платформі VBA для Excel, яка реалізує розроблений алгоритм розрахунку. Працездатність програми підтверджується результатами розрахунків. Досліджуються питання точності розрахунків, яку забезпечує програма, та необхідної для цього кількості ітерацій.

Ключові слова: алгоритм, програма, розв'язання рівняння, ітерація, датчик температури, похибка, точність, опір, розрахунок, числовий, діапазон.

LATENKO V., MYRONOV R., ORNATSKY I.
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SSI of Ukraine and NAS of Ukraine
LOGVYNENKO D.
SE "UKRMETRTESTSTANDART"

ALGORITHM AND PROGRAM FOR CALCULATING THE TEMPERATURE BY RESISTANCE OF THE RESISTIVE TEMPERATURE DETECTOR

It would not be an exaggeration to say that high-tech platinum resistance thermocouples such as Pt100 completely solve the problem of an electronic sensitive element for measuring temperatures in the widest range. The high linearity of the characteristics of Pt100 sensors allows to measure the temperature in small areas of the range with quite satisfactory accuracy without any means of linearization. Thus, Pt100 sensors are used in medical thermometers or temperature meters for heated rooms. However, in many applications of Pt100 sensors, the task of taking into account the nonlinearity of the characteristic to achieve the maximum possible accuracy of temperature measurement in a wide range, which can provide sensors.

An algorithm for iterative solution in numerical form of the Calendar-Van Dusen equation of the fourth degree is developed, which describes the dependence of the electrical resistance of the resistive temperature sensor Pt100 on the temperature in the range of minus temperatures. The program on the VBA for Excel platform, which implements the developed calculation algorithm, is listed. The efficiency of the program is confirmed by the results of calculations. The issues of accuracy of calculations provided by the program and the required number of iterations are investigated.

Keywords: algorithm, program, equation solution, iteration, temperature sensor, error, accuracy, resistance, calculation, numerical, range.

Вступ. Не буде перебільшенням твердження, що високотехнологічні платинові термодатчики опору на зразок Pt100 повністю вирішують проблему електронного чутливого елемента для вимірювання температур у найширшому діапазоні [1]. Висока лінійність характеристики датчиків Pt100 дозволяє вимірювати температуру на невеликих ділянках діапазону з цілком задовільною точністю без будь-яких засобів лінеаризації. Таким чином датчики Pt100 використовуються у медичних термометрах або вимірювачах температури опалювальних приміщень.

Проте, у багатьох сферах застосування датчиків Pt100 залишається актуальною задача врахування нелінійності характеристики для досягнення максимально можливої точності вимірювання температури у широкому діапазоні, яку здатні забезпечити датчики.

Аналіз стану досліджень. Більшість публікацій по темі врахування нелінійності датчиків Pt100 присвячені аналоговим схемам вимірювальних перетворювачів [2,3], критичному аналізу яких варто присвятити окрему статтю.

У публікаціях про цифрові вимірювальні перетворювачі розглядаються здебільшого технічні засоби максимально точного вимірювання опору датчика. Щодо врахування нелінійності датчика, то у публікаціях просто наводиться формула Календара -Ван Дусена залежності опору датчика Pt100 від температури, а саме:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100^\circ) \cdot t^3), \quad (1)$$

де t – температура, °C; $R_0 = 100$ Ом; $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$; $B = -5,775 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$; $C = 0$ для $t \geq 0$ та $C = 4,183 \cdot 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$ для $t < 0$. Значення параметрів наведені для датчиків з номінальним відношенням опорів $W_{100} = 1,3850$ [4].

За плюсових температур формула перетворюється на квадратне рівняння, розв'язання якого відносно температури докладно розглянуто у [5]. За мінусових температур формула Календара -Ван Дусена являє собою поліном 4-го ступеня, який не має аналітичного розв'язання у загальному вигляді. Алгоритми розв'язання рівняння у числовому вигляді практично не досліджувалися.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка алгоритму розрахунку температури за електричним опором термоперетворювача Pt100 з високою точністю у повному діапазоні температур, включно з мінусовими температурами.

Виклад основного матеріалу. Для побудови ітераційного алгоритму розрахунку температури за опором датчика Pt100 трансформуємо формулу Календара -Ван Дусена до вигляду рівняння:

$$t = (R - R_0 \cdot (1 + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100^\circ) \cdot t^3)) / (A \cdot R_0). \quad (2)$$

Введемо нові позначення для членів рівняння (2) та знаків операцій - такі, які прийнятні для Макросу у програмному середовищі Excel. Змінну t (температура) розділимо на дві окремі змінні - для лівої та правої сторони рівняння. За нових позначень рівняння набуває вигляду:

$$F = (R - R_0 \cdot (1 + B \cdot TP2^2 + C \cdot (TP2 - 100) \cdot TP2^3)) / (A \cdot R_0), \quad (3)$$

де F – температура, як функція; R_0 – змінене R_0 ; TP_2 – позначення температури t для правої сторони рівняння.

Для не мінусових температур (нульової або плюсових), коли коефіцієнт $C = 0$, рівняння (3) спрощується до вигляду:

$$F = (R/R_0 - 1 - B \cdot TP2^2) / A. \quad (4)$$

Похибка відхилення від рівності температур у рівнянні (4) можна визначити, як:

$$\Delta t_{EQU} = |F - TP2|, \quad (5)$$

Хоча похибка відхилення від рівності не еквівалентна до похибки визначення температури, її можна застосовувати для наближеної оцінки точності розрахунку. Якщо значення похибки (5) відхилення від рівності не перевищуватиме деяке наперед задане максимальне допустиме значення Δt_{EM} , тоді значення змінної F приймається за значення температури датчика

$$t \approx F; \quad (6)$$

а похибка розрахунку температури становитиме

$$\Delta t = F - t. \quad (7)$$

Ітераційний алгоритм наближеного розв'язання рівняння (2) наведено у вигляді схеми на рис.1.

У блоці 1 значення констант (A, B, C, R_0) та значення опору датчика R зчитуються з відповідних комірок Excel. У цьому ж блоці задаються початкові значення температури TP_2 та функції температури F , причому для правильного виконання алгоритму різниці між значеннями має бути великою за абсолютною величиною. При цьому, значення F є початковим значенням температури, а початкове значення TP_2 є несуттєвим для алгоритму, тому вибираються значення: $F = 1$, $TP_2 = 0$. Змінна J штучно введена до алгоритму для підрахунку кількості ітерацій, початкове значення - 0.

Блок 2 містить порівняння величини похибки (5) відхилення від рівності з максимальним допустимим значенням Δt_{EM} : у нашому прикладі – це значення 0,001. Під час першої перевірки умова не виконується через відповідний вибір початкових значень змінних F та TP_2 .

У блоці 3 змінній TP_2 присвоюється попереднє значення F , тому початкове значення TP_2 було несуттєвим для розрахунків. У блоці 4 виконання алгоритму розділяється на окремі гілки для мінусових та плюсових температур. Перевірка виконується, виходячи із значення опору датчика R , яке є меншим за R_0 за мінусових температур. У блоках 5 або 6 розраховується нове значення F за формулами для мінусових або не мінусових температур відповідно. Змінна кількості ітерацій J збільшується на 1 у кожному випадку.

Наступна ітерація починається з оцінки похибки (5) відхилення від рівності у блоці 2. Робота алгоритму припиняється, коли похибка стає меншою за максимальне допустиме значення. Останнє значення змінної F приймається за значення температури датчика t .

У таблиці 1 наведено лістинг програми на платформі VBA для Excel, в якій реалізується ітераційний алгоритм розрахунку температури за формулою Календара -Ван Дусена. Нумерація рядків у таблиці додана штучно для зручності посилань, порожні рядки також пронумеровані. Коментарі у програмі написані російською мовою, як у оригіналі програми.

У загальній частині програми під назвою Макрос 1 (1...5 рядки) пропущені визначення параметрів та значення опору R , які отримуються з комірок Excel: ці операції є несуттєвими для розгляду ітераційного алгоритму. У рядку 3 температурі T присвоюється значення, яке розраховується у підпрограмі F . У лапках перелічуються параметри та змінні, значеннями яких програма Макрос 1 обмінюється з підпрограмою F .

У рядках 7...24 повністю, без скорочень, наводиться підпрограма F . Типи змінних визначаються у рядках 7 та 9. Початкові значення змінних задаються у 10–12 рядках, що відповідає блоку 1 алгоритму на рис. 1.

Конструкція While...Wend у рядках 13...24 забезпечує виконання циклів ітерації з перевіркою умови припинення розрахунків, як у блоці 2 алгоритму: у рядку 13 перевіряється, чи не менше значення похибки (5) відхилення від рівності за максимальне допустиме значення (0.001).

Присвоєння змінній TP2 значення функції F відбувається у рядку 14 відповідно до блоку 3. Умова розділення підпрограми на гілки розрахунку мінусових та не мінусових температур перевіряється у рядку 15 за значенням опору датчика R відповідно блоку 4 алгоритму. Розрахунок значення функції F виконується у рядках 16–17 або 19–20 за відповідними формулами (3) або (4) для мінусових або не мінусових температур, як у блоках 5 або 6 алгоритму. У рядках 16 або 19 значення номера ітерації збільшується на 1, як у блоках 5 або 6 алгоритму.

Результати розрахунків, які виконуються ітераційною програмою для двох значень максимальної допустимої похибки Δt_{EM} та діапазону температур t від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, наведені у таблиці 2. У стовпчику 2 таблиці наводяться значення опору датчика Pt100, розраховані за формулою Календара-Ван Дусена (1).

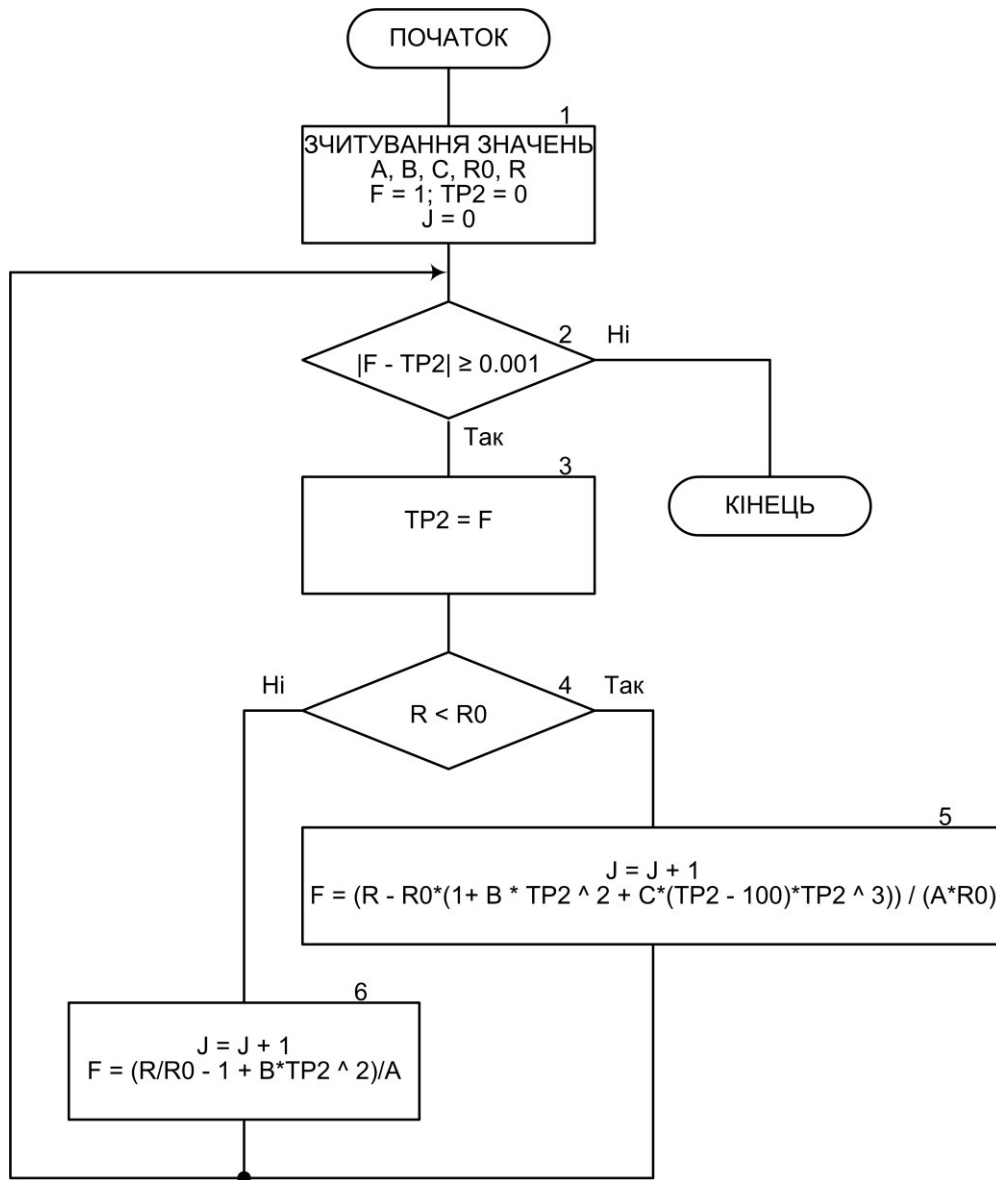


Рис. 1. Схема ітераційного алгоритму розрахунку температури датчика Pt100

У стовпчиках 3–5 таблиці 2 наведено результат ітераційного розрахунку температури (t_M), значення похибки за температурою Δt та кількість ітерацій J при максимальному допустимому значенні похибки відхилення від рівності $\Delta t_{EM} = 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. У стовпчиках 6–8 наведені значення тих самих величин при $\Delta t_{EM} = 0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

З аналізу даних у таблиці 2 для мінусових температур випливають такі висновки.

У разі припинення ітерацій за похибки відхилення від рівності меншій за $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, похибка розрахунку температури датчика Pt100 виявляється меншою за це значення в повному діапазоні температур (від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$). За мінусових температур для отримання результату потрібно не більше 6 ітерацій.

Залишкова похибка розрахунку є детермінованою функцією аргументу, значення якої хаотично розподілені на інтервалі:

$$-\Delta t_{EQU} < \Delta t < \Delta t_{EQU} \quad (8)$$

Деякі значення залишкової похибки наближаються до максимально допустимого значення розрахунку, що за високої чутливості вимірювального перетворювача може призводити до стрибків результатів вимірювання на величину молодшого розряду ($\pm 0,01$ °C). Уникнути таких стрибків можна шляхом зменшення значення допустимої похибки розрахунку.

Таблиця 1

Програма ітераційного розрахунку температури датчика Pt100

1	Sub Макрос1()
2	
3	T = TP2(R, A, B, C, R0, J)
4	
5	End Sub
6	
7	Public Function TP2(R As Double, A As Single, B As Single, C As Single, R0 As Double, J As Single) As Double
8	
9	Dim F As Double
10	J = 0 'начальное значение
11	TP2 = 0 'начальное значение
12	F = 1 'начальное значение
13	While Abs(F - TP2) >= 0.001
14	TP2 = F
15	If R < R0 Then
16	J = J + 1
17	F = (R - R0 * (1 + B * TP2 ^ 2 + C * (TP2 - 100) * TP2 ^ 3)) / (A * R0) 'от -40 до 0 градусов
18	Else
19	J = J + 1
20	F = (R / R0 - B * TP2 ^ 2 - 1) / A 'от 0 до 100 градусов
21	End If
22	Wend
23	
24	End Function

Таблиця 2

Результати ітераційного розрахунку температури датчика Pt100

t	Rt	$\Delta t_{EM} = 0.01$			$\Delta t_{EM} = 0.0001$		
		t _M	Δt	J	t _M	Δt	J
-200	18.5201	-200.0011	-0.0011	6	-200.0000	0.0000	8
-150	39.7232	-149.9988	0.0012	5	-150.0001	-0.0001	6
-100	60.2558	-100.0024	-0.0024	4	-99.9999	0.0001	5
-50	80.3063	-49.9937	0.0063	3	-50.0000	0.0000	5
0	100.0000	0.0001	0.0001	2	0.0000	0.0000	3
100	138.5055	99.9987	-0.0013	4	100.0000	0.0000	5
200	175.8560	199.9988	-0.0012	5	199.9999	-0.0001	6
300	212.0515	299.9910	-0.0090	5	299.9999	-0.0001	7
400	247.0920	399.9956	-0.0044	6	400.0000	0.0000	8
500	280.9775	499.9975	-0.0025	7	500.0000	0.0000	9
600	313.7080	599.9912	-0.0088	7	600.0000	0.0000	10
700	345.2835	699.9947	-0.0053	8	700.0000	0.0000	11
800	375.7040	799.9964	-0.0036	9	800.0000	0.0000	12

У разі зменшення допустимої похибки рівняння до 0,0001 °C максимальна кількість ітерацій зростає несуттєво: від 6 до 8. Але похибка розрахунку температури для деяких значень перевищує допустиму похибку рівняння, наприклад, для температур -100 °C та -150 °C. Це перевищення можна пояснити тільки недостатньою розрядністю операційної системи для виконання операцій з такою надлишковою точністю.

До незначних недоліків ітераційного алгоритму можна віднести також різну кількість ітерацій для різних значень температури, що вимагає резервування машинного часу на максимальну кількість ітерацій. Це може обмежити швидкодію мікропроцесорних вимірювачів температури з обмеженими операційними ресурсами.

Наведені висновки розповсюджуються і на діапазон не мінусових температур, тільки для отримання такої ж точності розрахунків на краю діапазону потрібна більша кількість ітерацій. Це легко пояснюється значно більшим діапазоном плюсових температур, ніж мінусових.

Для не мінусових температур ітераційний алгоритм був застосований заради спрощення алгоритму та уніфікації операцій. За необхідності зменшення часу виконання розрахунків для не мінусових температур можна застосувати пряме розв'язання квадратного рівняння, на яке перетворюється формула Календара - Ван Дусена [5]:

$$t = \frac{-A + A \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{B}{A^2} \cdot \left(1 - \frac{R}{R_0}\right)}}{2 \cdot B} \quad (9)$$

Програмна реалізація цієї функції не є проблемою для середовища VBA або для мікропроцесорної техніки, тому не потребує додаткового дослідження.

Висновки. Запропонований ітераційний алгоритм дозволяє розраховувати температуру датчика Pt100 за значенням електричного опору у повному діапазоні температур датчика – від мінусових до плюсових. Критерієм достатнього наближення до точного рішення рівняння Календара-Ван Дусена виступає саме значення температури, що дозволило звести розрахунки до розрахунку одного ступеневого поліному за одну ітерацію.

Програма, що реалізує алгоритм на платформі VBA для Excel, забезпечує розрахунок температури з прецизійною точністю до 0,0001 °C з кількістю ітерацій за температур від мінус 200 °C до 0 °C – не більше 8, від 0 °C до 800 °C – не більше 12. У програмі використовуються прості математичні операції, які можуть виконуватися з великою точністю: 4 арифметичних операції та зведення в ступені.

Працездатність програми підтверджується наведеними результатами розрахунків.

За не мінусових температур можна застосувати прямий розрахунок температури без ітерацій., що не потребує дослідження.

Література

1. Новые платиновые датчики температуры / Маргелов А. // Новости электроники – 2007. №1. –С. 17 - 18.
2. The Analog Linearization of Pt100 Working Characteristic / R.Radetic, M.Pavlov-Kagadejev, N.Milivojevic // Serbian journal of electrical engineering - 2015.- Vol. 12, № 3. - P.345-357. ISSN 2217-7183
3. Терморезистивний перетворювач з аналоговою лінеаризацією / О.В. Бойко, О.П. Чабан, Р.О. Матвій, В.Р. Куць // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 2013. - №1. – С.57-62. ISSN 2219-9365
4. ДСТУ 2858:2015. Термоперетворювачі опору. Загальні технічні вимоги і методи випробування. (Чинний від 2017-07-01) Вид. офіц. Київ. - 2015. - 16 с.
5. Метрологічні питання застосування термометрів опору для метеорологічних спостережень / В.І. Латенко // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – №1. – С.242 – 248. ISBN 5-7763-8361-7.

References

1. Novyye platinovyye datchiki temperatury / Margelov A. // Novosti elektroniki – 2007. №1. – 17-18 p.
2. The Analog Linearization of Pt100 Working Characteristic / R.Radetic, M.Pavlov-Kagadejev, N.Milivojevic // Serbian journal of electrical engineering - 2015. - Vol. 12, № 3. - 345-357 p. ISSN 2217-7183
3. Termorezistyvnyy peretvoryuvach z analohovoyu linearyzatsiyeyu / O.V. Boyko, O.P. Chaban, R.O. Matviyiv, V.R. Kuts' // Measuring and computing in technological processes. – 2013. - №1. – 57-62 p. ISSN 2219-9365
4. DSTU 2858:2015. Thermo-converters of resistance. General technical requirements and test methods. (Valid from 2017-07-01). Kyiv. - 2015. - 16 p.
5. Metrological issues of application resistance thermometers for meteorological observations / V.I. Latenko // Bulletin of Engineering Academy of Ukraine. – 2014. – №1. – 242 – 248 p. ISBN 5-7763-8361-7

Надійшла / Paper received: 19.01.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020