

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ КВАЗІЛІНІЙНОГО РЕЗИСТИВНОГО СЕНСОРА Pt100

¹І.В. Герасименко^{1*}, Є.О. Зайцев^{2**}, докт.техн.наук, В.І. Латенко^{1***}, канд.техн.наук, Р.Д. Миронов^{1****}, І.А. Орнатський^{1*****}, канд.техн.наук, С.О. Філь^{1*****}

¹ Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, пр. Науки, 37, Київ, 03028, Україна. E-mail: lat3185@gmail.com

² Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: zaitsev@i.ua

У роботі досліджуються ітераційні алгоритми розв'язання рівняння за формулою Календара-Ван Дусина, що описує залежність електричного опору сенсора сімейства Pt100 від температури. Це сімейство платинових сенсорів вважається квазілінійним, але для високоточних вимірювань нелінійністю датчика неможна знехтувати, тому необхідно розв'язувати нелінійне рівняння Pt100. За мінусових температур рівняння за формулою Календара-Ван Дусина сягає четвертого ступеня та не має розв'язання відносно температури у аналітичному вигляді. Аналіз відомого ітераційного алгоритму наближеного розв'язання рівняння виявляє недоліки цього алгоритму. Залишкова похибка розв'язання не є монотонною функцією аргументу, адже містить екстремуми, до того ж знак похибки змінюється на протилежний після кожного екстремума. Метою даного дослідження було отримання алгоритму, який забезпечує залишкову похибку у вигляді монотонної детермінованої функції аргументу з мінімізацією максимального значення похибки. Показано можливість модифікувати ітераційний алгоритм-прототип елементарним способом, зафіксувавши кількість ітерацій. Залишкова похибка розв'язання рівняння за модифікованим алгоритмом має вигляд монотонної детермінованої функції аргументу. Припускається, що таким способом можна удосконалити будь-який ітераційний алгоритм розрахунку. При цьому мінімізація значень похибки модифікованого алгоритму досягається за рахунок встановлення максимальної кількості ітерацій порівняно з алгоритмом-прототипом. Для подолання цього недоліку модифікованого алгоритму запропоновано новий алгоритм, у якому окрім фіксованої кількості ітерацій використовується властивість малості складових вищих ступенів. Показано високу ефективність нового алгоритму, що усього за чотири ітерації зводить залишкову похибку розв'язання до мізерно малої величини. Стверджується, що висока ефективність нового алгоритму робить непотрібними подальші дослідження у напрямку його удосконалення. У статті наводиться блок-схема нового алгоритму та відповідна програма на платформі VBA для Excel, що придатна для безпосереднього використання у програмному забезпеченні вимірювачів температури на базі резистивних термодатчиків Pt100. Бібл. 5, рис. 4, табл. 3.

Ключові слова: квазілінійний, алгоритм, програма, рівняння, ітерація, сенсор, температура, похибка.

Вступ. Сьогодні платинові термоперетворювачі опору є, напевно, найбільш розповсюдженими сенсорами температури. Цьому сприяють такі їхні переваги як невелика вартість, простота отримання значення температури у електронному вигляді, висока стабільність параметрів та квазілінійність. Зокрема, відхилення від лінійності термоперетворювачів сімейства Pt100 становить лише 0,38% у діапазоні від -200°C до 800°C [1]. Цього достатньо, щоби використовувати їх у багатьох випадках як лінійні перетворювачі. З іншого боку, такі сфери як енергетика, метеорологія, виробництво та експлуатація охолоджувальних агрегатів потребують великої кількості бюджетних сенсорів для вимірювання температури з максимальною точністю, яку здатні забезпечити термоперетворювачі опору. Для таких сфер застосування термоперетворювачів опору актуальною є задача створення різних програмних та апаратних засобів для точного визначення температури за опором сенсорів з урахування нелінійності характеристик сенсорів. У даній роботі розглядаються засоби врахування нелінійності сенсорів Pt100 як найпоширенішого сімейства термоперетворювачів опору. Характеристики інших платинових та мідних термоперетворювачів якісно мало чим від-

© Герасименко І.В., Зайцев Є.О., Латенко В.І., Миронов Р.Д., Орнатський І.А., Філь С.О., 2023
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-5892-8325>; ** <https://orcid.org/0000-0003-3303-471X>;
*** <https://orcid.org/0000-0001-9818-9830>; **** <https://orcid.org/0000-0003-0912-4344>;
***** <https://orcid.org/0000-0002-9075-1072>; ***** <https://orcid.org/0000-0002-0426-0403>

різняються від характеристик Pt100, тому результати дослідження можуть бути застосовані і до інших типів сенсорів.

Хоча широкому поширенню платинових сенсорів сприяла простота отримання значень температури саме у цифровому вигляді, у публікаціях розглядаються здебільшого схемні (аналогові) засоби лінеаризації характеристик сенсорів. Такі засоби є значно складнішими за алгоритмічні для практичної реалізації. До того ж аналогові схеми лінеаризації суттєво поступаються сучасним аналого-цифровим перетворювачам за точністю реалізації та стабільністю параметрів, тому не дають змоги забезпечити високу точність вимірювального перетворення [1–3].

У деяких публікаціях розглядаються комбіновані схемно-алгоритмічні засоби врахування нелінійності характеристик термоперетворювачів опору. Так, у [4] автори пропонують оригінальний комбінований метод лінеаризації характеристики платинового сенсора, моделюючи схемними засобами три характерні точки характеристики сенсора. Результати аналого-цифрового вимірювального перетворення у трьох точках дають змогу спростити аналітичні формули розрахунку температури, порівняно з рівнянням Календара-Ван Дусина. Для цього авторам довелося застосувати 2-х дровову схему підключення сенсора, яка не дозволяє компенсувати негативний вплив опору під'єднувальних дровів на точність вимірювання. Досить велика кількість аналогових елементів також зменшує потенційну точність вимірювального перетворення порівняно з 4-х дрововими схемами підключення до аналого-цифрового перетворювача [1]. Точність комбінованого перетворення автори порівнюють з точністю ітеративного алгоритму числового розв'язання рівняння Календара-Ван Дусена за 2 ітерації, тоді як із збільшенням кількості ітерацій точність розрахунку збільшується на порядки. Натомість, алгоритм передбачає додаткові процедури аналого-цифрового перетворення, які потребують значно більше машинного часу, та додаткові ресурси мікропроцесора порівняно із збільшенням кількості ітерацій числового розрахунку. Вказані недоліки запропонованого рішення нівелюють позитивний ефект від спрощення аналітичних формул розрахунку.

У статті [5] автори запропонували простий ітеративний алгоритм розрахунку температури за значенням опору резистивного сенсора, виходячи з формули Календара-Ван Дусена. Недоліком цього алгоритму є немонотонна функція похибки, яка містить екстремальні викиди, що зменшує точність вимірювальних перетворень у реальних умовах під впливом завад.

Метою дослідження є розробка такого алгоритму розрахунку температури сенсорів сімейства Pt100 та відповідної програми, що забезпечують монотонну детерміновану функцію похибки розрахунку та мінімізують значення похибки.

1. Постановка задачі. Нелінійна залежність електричного опору платинового сенсора Pt100 від температури визначається формулою Календара-Ван Дусена у вигляді [1]

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

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 коефіцієнтів наведено для сенсорів з номінальним відношенням опорів $W_{100} = 1,3850$.

Запропонований у [5] конкретний алгоритм (далі – прототип) визначення температури сенсора Pt100 ґрунтується на формулі Календара-Ван Дусена, яка трансформується до вигляду рівняння [4, 5]

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

де t_F – розраховане значення температури як функції від присвоєного значення температури t_A .

Точному розв'язанню рівняння відповідає значення рівних температур $t_F = t_A$, а похибка грубо оцінюється за абсолютною величиною різниці

$$\Delta t_D = t_F - t_A. \quad (3)$$

Перше значення температури вибирається довільним чином, наприклад, $t_A = -1^\circ\text{C}$. За формулою (2) розраховується нове значення температури t_F . Якщо різниця Δt_D не менша за встановлене порогове значення Δt_M , тоді щойно розраховане значення t_F присвоюється аргументу t_A та розраховується нове значення температури t_F . Ітерації продовжуються, поки оцінка похибки (3) не стане меншою за порогове значення Δt_M , за результат приймається останнє розраховане значення t_F .

Похибка розрахунку визначається виразом

$$\Delta t_I = t_F - t, \quad (4)$$

де t – дійсне значення температури на відміну від t_A у виразі (3) для грубої оцінки цієї похибки.

t	R	t_F	Δt_I	J	t_F	Δt_I	J
1	2	3	4	5	6	7	8
-200	18.5201	-200.0011	-0.0011	6	-199.9895	0.0105	5
-190	22.8255	-189.9930	0.0070	5	-189.9930	0.0070	5
-180	27.0964	-179.9953	0.0047	5	-179.9953	0.0047	5
-170	31.3350	-169.9970	0.0030	5	-169.9970	0.0030	5
-160	35.5433	-159.9980	0.0020	5	-159.9980	0.0020	5
-150	39.7232	-149.9988	0.0012	5	-149.9988	0.0012	5
-140	43.8764	-139.9992	0.0008	5	-139.9992	0.0008	5
-130	48.0048	-130.0088	-0.0088	4	-129.9995	0.0005	5
-120	52.1098	-120.0058	-0.0058	4	-119.9997	0.0003	5
-110	56.1930	-110.0037	-0.0037	4	-109.9998	0.0002	5
-100	60.2558	-100.0024	-0.0024	4	-99.9999	0.0001	5
-90	64.2996	-90.0014	-0.0014	4	-90.0000	0.0000	5
-80	68.3254	-80.0008	-0.0008	4	-80.0000	0.0000	5
-70	72.3345	-70.0004	-0.0004	4	-70.0000	0.0000	5
-60	76.3278	-60.0002	-0.0002	4	-60.0000	0.0000	5
-50	80.3063	-49.9937	0.0063	3	-50.0000	0.0000	5
-40	84.2707	-39.9969	0.0031	3	-40.0000	0.0000	5
-30	88.2217	-29.9987	0.0013	3	-30.0000	0.0000	5
-20	92.1599	-19.9996	0.0004	3	-20.0000	0.0000	5
-10	96.0859	-10.0000	0.0000	3	-10.0000	0.0000	5

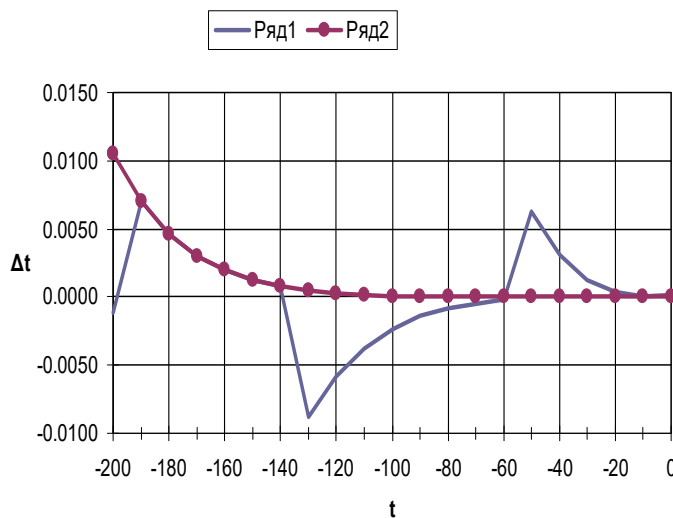


Рис. 1

співпадають з рівномірною сіткою даних.

Наявність екстремумів похибки зменшує точність вимірювання температури у реальних умовах, особливо у випадках спостережень за зміною температури за наявності завод. Зменшити амплітуди екстремумів похибки можливо шляхом зниження порогового значення похибки, але при цьому зростає кількість ітерацій. Повністю позбутися екстремумів похибки цей ітераційний алгоритм не дає змоги через притаманний йому пороговий принцип припинення розрахунків.

2. Модифікація ітераційного алгоритму. Функція похибки на рис. 1 на інтервалах між екстремумами прямує до нуля із зменшенням температури за умови, що кількість ітерацій не змінюється. Тому модифікуємо алгоритм таким чином, аби кількість ітерацій була фіксованою, а оцінка похибки за виразом (3) не враховувалася.

Результати розрахунку за ітераційним алгоритмом-прототипом для мінусових температур наведено у табл. 1. У стовпчику 1 наведено дійсне значення температури, у 2-му – відповідне значення опору сенсора за формулою Календара-Ван Дусена. У 3...5 наведено розраховані значення температури, похибка та кількість ітерацій J за порогового значення $\Delta t_M = 0,01$ °C. Стовпчики 6...8 відведені для значень відповідних величин, які будуть розраховані за новим алгоритмом (з фіксованою кількістю ітерацій) у наступному розділі.

На рис. 1 наведено графік залежності похибки розрахунку (4) від температури (ряд 1), що відповідає стовпчику 4 табл. 1. Для наглядності окремі точки графіку з'єднані плавною кривою лінією. Якщо розглядати похибку як функцію температури, то вона немонотонна, причому екстремуми співпадають із змінами кількості ітерацій, як видно з табличних даних. У разі наближення ліворуч за графіком до точок збільшення кількості ітерацій амплітуди екстремальних значень похибки асимптотично наближаються до порогового значення ($\pm \Delta t_M$). Після проходження кожного екстремума похибка міняє знак та зменшується стрибком. Максимальні значення екстремумів не відображаються на графіку через те, що не

Як і у алгоритмі-прототипі, у модифікованому алгоритмі спочатку задається початкове довільне значення температури, наприклад, $t_A = -1^\circ\text{C}$. Далі розраховується нове значення температури t_F за формулою (2) – так само, як у алгоритмі-прототипі. Розраховане значення температури присвоюється аргументу формули

$$t_A = t_F.$$

Після цього розраховується нове значення змінної t_F за формулою (2). Такі операції присвоювання значень аргументу та розрахунку нового значення повторюються кілька разів (ітерацій). Останнє розраховане значення температури t_F приймається за результат розрахунку температури.

Результати розрахунку для фіксованої кількості ітерацій ($J = 5$) наведено у стовпчиках 6...8 табл. 1, графік похибки наведений на рис. 1 (ряд 2). Зауважимо, що на інтервалі від -190°C до -140°C , на якому кількість ітерацій алгоритмів співпадають (5 ітерацій), графіки функцій похибки модифікованого алгоритму та прототипу очікувано співпадають.

Модифікований алгоритм забезпечує монотонну, без стрибків, залежність похибки від температури. Можна припустити, що фіксація кількості ітерацій дає змогу зробити монотонною функцію похибки для будь-якого ітераційного алгоритму, тобто є універсальним прийомом. Для зменшення максимальної похибки розрахунку до рівня похибки алгоритму-прототипу потрібно вибирати максимальну кількість ітерацій порівняно з прототипом. Необхідність встановлювати максимальну кількість ітерацій є недоліком модифікованого алгоритму через зайвий машинний час розрахунків.

Далі буде запропоновано новий алгоритм, що дасть змогу зменшити максимальну похибку розрахунку без збільшення кількості ітерацій.

3. Обґрунтування нового алгоритму розрахунку температури. Зауважимо, що для плюсових температур формула Календара-Ван Дусена (1) перетворюється на квадратне рівняння виду

$$R_Q = R_0 \cdot (I + A \cdot t + B \cdot t^2), \quad (5)$$

яке має безпосереднє розв'язання у вигляді

$$t_Q = \frac{-A + A \cdot \sqrt{I - 4 \cdot \frac{B}{A^2} \cdot \left(I - \frac{R_Q}{R_0}\right)}}{2 \cdot B}. \quad (6)$$

Введемо позначення для суми складових вищих ступенів формули Календара-Ван Дусена, яка відрізняється від нуля тільки за мінусових температур

$$R_C = R_0 \cdot C \cdot (t - 100^\circ) \cdot t^3. \quad (7)$$

Тоді формула Календара-Ван Дусена для мінусових температур запишеться у вигляді

$$R = R_Q + R_C. \quad (8)$$

Розраховані числові значення величин для діапазону температур будемо заносити до табл. 2. У стовпчиках 2 та 3 містяться значення складової вищих ступенів та сумарне значення опору (8) відповідно. Вміст стовпчиків 5 ÷ 8 буде розглянуто нижче. Порівнюючи числові значення складової вищих ступенів R_C та опору сенсора R можна впевнитися, що найбільше за абсолютною величиною значення складової вищих ступенів – 1,05 Ом (при -200°C) складає приблизно 18-у частину значення опору сенсора $R = 18,52$, тобто мінімально впливає на кінцевий результат розрахунків. Звідси випливають два твердження:

- 1) для наближеного розрахунку температури за опором сенсора сумою складових вищих ступенів можна знехтувати;
- 2) з достатньою для розрахунків точністю, числові значення суми складових вищих ступенів можна вважати незмінною для деякого невеликого діапазону температури порівняно з повним діапазоном мінусових температур (200°C).

Скористаємося цими твердженнями для побудови нового алгоритму розв'язання рівняння Календара-Ван Дусена.

За вхідне значення під час проведення розрахунків приймається значення опору сенсора R . Якщо, у грубому наближенні, знехтувати сумою складових вищих ступенів ($R_C \approx 0$), рівняння сенсора перетворюється на квадратне рівняння за формулою (5), тобто

$$R_Q \approx R. \quad (9)$$

Таблиця 2							
<i>t</i>	<i>R_C</i>	<i>R</i>	<i>t_{Q0}</i>	<i>R_{C0}</i>	<i>R_{Q1}</i>	<i>t_{Q1}</i>	Δt_1
1	2	3	4	5	6	7	8
-200	-1.00	18.52	-202.42	-1.05	19.57	-199.89	0.1096
-180	-0.68	27.10	-181.66	-0.71	27.80	-179.94	0.0564
-160	-0.45	35.54	-161.09	-0.46	36.00	-159.97	0.0270
-140	-0.28	43.88	-140.68	-0.28	44.16	-139.99	0.0118
-120	-0.16	52.11	-120.39	-0.16	52.27	-120.00	0.0046
-100	-0.08	60.26	-100.21	-0.08	60.34	-100.00	0.0015
-80	-0.04	68.33	-80.10	-0.04	68.36	-80.00	0.0004
-60	-0.01	76.33	-60.04	-0.01	76.34	-60.00	0.0001
-40	0.00	84.27	-40.01	0.00	84.27	-40.00	0.0000
-20	0.00	92.16	-20.00	0.00	92.16	-20.00	0.0000
0	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.0000

однаковим, що дає змогу уточнити суму квадратного тричлена у околицях точки t_{Q0} , відокремлюючи суму вищих ступенів від значення опору сенсора

$$R_{Q1} = R - R_0 \cdot C \cdot (t_{Q0} - 100^\circ) \cdot t_{Q0}^3. \quad (11)$$

Корінь квадратного рівняння (6) із розрахованим значенням суми квадратного тричлена R_{Q1} як аргумента, буде більш точним рішенням рівняння Календара-Ван Дусена (1). У цьому разі похибку розрахунку температури можна визначити як

$$\Delta t_J = t_{Q1} - t, \quad (12)$$

де індекс J – номер ітерації. Така послідовність операцій є одною ітерацією нового алгоритму.

Розраховані числові значення величин для однієї ітерації наведено у стовпчиках 4 ÷ 8 табл. 2. На рис. 2 представлені значення похибки Δt_1 із стовпчика 8 табл. 2 для діапазону мінусових температур. З графіку можна побачити, що функція похибки монотонна та круто спадає до нуля, причому крутизна спадання вища порівняно з прототипом. При цьому максимальне значення похибки на краю діапазону на кілька порядків перевищує похибку модифікованого алгоритму після 5-ти ітерацій. Отже, для зменшення похибок потрібно збільшити кількість ітерацій нового алгоритму, а висока крутизна спаду похибки дає змогу очікувати кращого результату, ніж у прототипа.

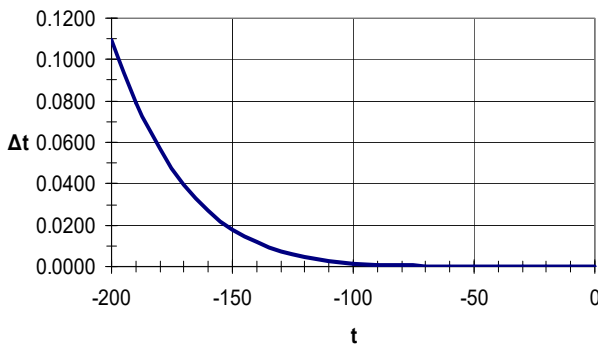


Рис. 2

алгоритму переписемо формули (6) та (11) у вигляді функцій у позначеннях середовища VBA для Excel відповідно:

$$Tsq = \left(-A + A \cdot Sqr \left(1 - 4 \cdot B \cdot \left(1 - R_Q / R_0 \right) / A^2 \right) \right) / (2B), \quad (13)$$

$$Rquadr = R_X - R_0 \cdot C \cdot (T_2 - 100) \cdot T_2^3, \quad (14)$$

де $R_Q = R_Q$, $R_0 = R_0$, $R_X = R$, $T_2 = t_Q$ – нові позначення тих самих величин для програмного середовища.

Схему нового алгоритму наведено на рис. 3. Формули (13) та (14) реалізовано у вигляді функцій (блоки 8, 9), які викликаються з основного алгоритму. Робота алгоритму починається із

Корінь цього квадратного рівняння розраховується за формулою (6), отримане значення температури позначимо через t_{Q0} .

Сума складових вищих ступенів у точці t_{Q0} у відповідності до (7) дорівнює

$$R_C = R_0 \cdot C \cdot (t_{Q0} - 100^\circ) \cdot t_{Q0}^3. \quad (10)$$

Згідно другого твердження, значення цієї суми у невеликому діапазоні температур навколо температури t_{Q0} буде практично

зчитування значень коефіцієнтів та опору сенсора з відповідних комірок та скидання в нуль змінної кількості ітерацій J (блок 1).

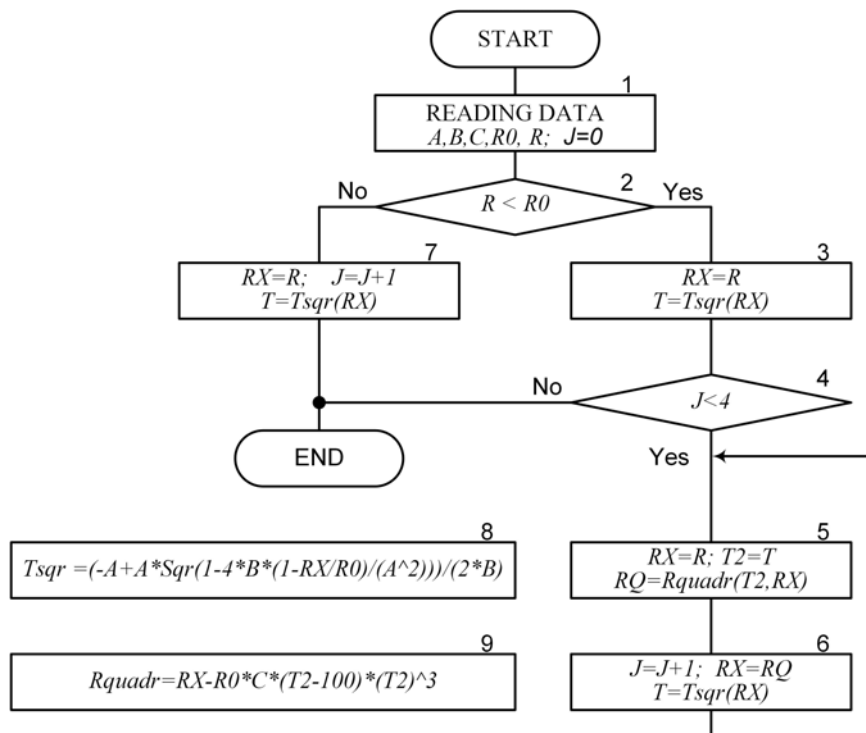


Рис. 3

Умовний блок 2 розділяє алгоритм на гілки для мінусових або немінусових температур за значенням опору сенсора. Якщо опір сенсора R не менший за R_0 , тоді алгоритм переходить на гілку немінусових температур, тобто – нульової або плюсових.

За не мінусових температур значення температури розраховується за точною формулою квадратного кореня (13) у блоці 7. Змінна J збільшується до 1 – це залишається ознакою не мінусової температури. На цьому робота цієї гілки алгоритму закінчується.

У гілці мінусових температур змінній RX присвоюються значення опору сенсора та виконується перший грубий розрахунок температури як кореня квадратного рівняння (блок 3).

Оскільки кількість ітерацій ще залишається нульовою, умова у блоці 4 виконується, алгоритм переходить до блоку 5.

У блоці 5 змінній T_2 присвоюється раніше розраховане (у блоці 3) значення температури, а змінній RX – значення опору сенсора. Розраховується уточнена сума квадратного тричлена RQ за формулою (14).

У блоці 6 уточнене значення суми квадратного тричлена RQ присвоюється змінній RX та розраховується нове значення кореня квадратного рівняння T за формулою (13). Змінна кількості ітерацій J збільшується на 1. На цьому закінчується перша ітерація розрахунку, що розглядалася у попередньому розділі 3.

Розрахунки у блоках 5 та 6 повторюються, поки кількість ітерацій не досягне встановленого значення. У нашому прикладі встановлена кількість ітерацій 4. Останнє значення кореня T , яке розраховується у блоці 6, приймається за результат розрахунку температури.

Лістинг програми, що реалізує запропонований алгоритм в середовищі програмування VBA для Excel, наведено на рис. 4. Рядкам програми присвоєні номери для зручності посилань.

Програма починається з визначення типів змінних у рядках 20...40. Операції зчитування значень коефіцієнтів та опору сенсора (блок 1 схеми алгоритму) у лістингу пропущені як несуттєві.

Функції розрахунку квадратного кореня (13) та виділення суми квадратного тричлена (14) розміщені в кінці програми (рядки 240 та 270).

Після обнулення кількості ітерацій ($J = 0$) у рядку 50 перевіряється умова 60, що розділяє програму на гілки для мінусової та немінусової температури. Гілка для мінусових температур займає рядки від 70 до 160, для немінусових – від 170 до 200.

```

10 Sub Макрос1 ()
20 Dim RX As Double, T2 As Double
30 Dim A As Single, B As Single, C As Single, R0 As Double
40 Dim RQ As Double, R As Double, T As Double, J As Single, T1 As Double

50 J = 0
60 If R < R0 Then
70     RX = R
80     T = Tsqr(T2, RX, A, B, C, R0)
90     While J < 4
100        RX = R
110        T2 = T
120        RQ = Rquadr(T2, RX, A, B, C, R0)
130        RX = RQ
140        T = Tsqr(T2, RX, A, B, C, R0)
150        J = J + 1
160    Wend
170 Else
180     J = J + 1
190     RX = R
200     T = Tsqr(T2, RX, A, B, C, R0)
210 End If

220 End Sub

230 Function Tsqr(T3 As Double, RQ As Double, A As Single, B As Single, C As Single,
R0 As Double) As Double
240     Tsqr = (-A + A * Sqr(1 - 4 * B * (1 - RQ / R0) / (A ^ 2))) / (2 * B)
250 End Function

260 Function Rquadr(T2 As Double, RX As Double, A As Single, B As Single, C As
Single, R0 As Double) As Double
270     Rquadr = RX - R0 * C * (T2 - 100) * (T2) ^ 3
280 End Function

```

Рис. 4.

За мінусової температури у рядку 80 грубо розраховується температура як корінь квадратного рівняння. У рядку 120 уточнюється сума квадратного тричлена, щоб у рядку 140 розрахувати уточнене значення кореня. Пара операндів у рядках 90 та 160 забезпечують 4-ий цикл повторення розрахунків.

Задля визначення немінусової температури у рядку 200 одразу розраховується значення квадратного кореня рівняння.

Результати розрахунків за допомогою нової програми наведено у табл. 3 для двох значень кількості ітерацій J за мінусових температур – 1 та 4.

5. Обговорення. Запропонований алгоритм розрахунку забезпечує монотонну, без екстремумів, детерміновану функцію похибки від температури та мінімізацію похибки розрахунку.

Як можна бачити з табл. 3, за 4 ітерації новий алгоритм забезпечує розрахунок температури з похибкою, меншою за $0,0001^{\circ}\text{C}$ в діапазоні температур від -200°C до 800°C . Порівняно з цим похибка алгоритму-прототипу та його модифікації за кількості ітерацій 5 перевищувала величину $0,01^{\circ}\text{C}$. Таким чином, новий алгоритм забезпечує розрахунок температури точніше на кілька порядків за меншу кількість ітерацій.

Для об'єктивної оцінки досягнутої точності розрахунків варто співставити значення похибки розрахунку з похибкою самих сенсорів. Так максимальна допустима похибка сенсора Pt100, найвищого за класифікацією класу точності AA, визначається формулою [1]

$$\Delta t_{AA} = \pm(0,1 + 0,0017 \cdot |t|). \quad (15)$$

Числові значення похибки у діапазоні температур наведено у стовпчику 9 табл. 3. За мінусових температур максимальне значення допустимої похибки сягає $0,44^{\circ}\text{C}$ на краю діапазону.

Формула (15) та розраховані значення похибки відображають, головним чином, технологічні можливості відтворення номінальних значень коефіцієнтів формули Календара-Ван Дусена за масового виробництва сенсорів. Висока довготривала стабільність платинових сенсорів Pt100 дає

зможу зменшити їхню похибку приблизно до $0,01^{\circ}\text{C}$ за рахунок індивідуального калібрування значень коефіцієнтів [5].

Таблиця 3								
		При $t < 0$ $J = 1$			При $t < 0$ $J = 4$			Pt100
t	Rt	t_Q	Δt	J	t_Q	Δt	J	Δt_{AA}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	18.5201	-199.8904	0.1096	1	-200.0000	0.0000	4	0.44
-150	39.7232	-149.9819	0.0181	1	-150.0000	0.0000	4	0.36
-100	60.2558	-99.9985	0.0015	1	-100.0000	0.0000	4	0.27
-50	80.3063	-50.0000	0.0000	1	-50.0000	0.0000	4	0.19
0	100.0000	0.0000	0.0000	1	0.0000	0.0000	1	0.10
100	138.5055	100.0000	0.0000	1	100.0000	0.0000	1	0.27
200	175.8560	200.0000	0.0000	1	200.0000	0.0000	1	0.44
300	212.0515	300.0000	0.0000	1	300.0000	0.0000	1	0.61
400	247.0920	400.0000	0.0000	1	400.0000	0.0000	1	0.78
500	280.9775	500.0000	0.0000	1	500.0000	0.0000	1	0.95
600	313.7080	600.0000	0.0000	1	600.0000	0.0000	1	1.12
700	345.2835	700.0000	0.0000	1	700.0000	0.0000	1	1.29
800	375.7040	800.0000	0.0000	1	800.0000	0.0000	1	1.46

Максимальна допустима похибка вимірювального перетворювача, в якому використовується алгоритм, має бути ще у 3 – 5 разів меншою, тобто не перевищувати $0,003^{\circ}\text{C}$. Відповідно, похибка програмного забезпечення вимірювального перетворювача, як однієї із складових сумарної похибки, не має перевищувати $0,001^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, величину максимальної похибки $\Delta t_{\max} = 0,001^{\circ}\text{C}$ можна вважати адекватною оцінкою для максимальної похибки алгоритму або інших окремих складових вимірювального перетворювання для сенсора

Pt100 з індивідуально каліброваними коефіцієнтами.

Точність розрахунків за новим алгоритмом (похибка менша за $0,0001^{\circ}\text{C}$) на порядок перевищує навіть такі жорсткі вимоги до точності алгоритму.

Висновки. Недоліком відомого ітераційного алгоритму-прототипу розрахунку температури сенсора Pt100 є не монотонна, з екстремальними максимумами, функція похибки у діапазоні мінусових температур.

Якщо зафіксувати кількість ітерацій у алгоритмі-прототипі, функція похибки модифікованого таким елементарним чином алгоритму стає монотонною, без екстремальних максимумів. Можна припустити, що цей прийом фіксації кількості ітерацій дає змогу забезпечити монотонність функції похибки будь-якого ітераційного алгоритму. Проте, задля зменшення максимальної похибки до рівня алгоритма-прототипу необхідно вибирати максимальну кількість ітерацій.

Запропоновано новий алгоритм розрахунку температури сенсора Pt100 за рівнянням Календара-Ван Дусена, який забезпечує монотонність функції похибки та зменшення похибки розрахунку без збільшення фіксованої кількості ітерацій. Похибка розрахунку зменшується нижче за $0,0001^{\circ}\text{C}$ лише за 4 ітерації, що з дуже великим запасом задовольняє найжорсткіші вимоги до точності розрахунку для сенсорів з індивідуальним калібруванням коефіцієнтів.

Новий алгоритм забезпечує таку високу, навіть надлишкову, точність розрахунків, що робить непотрібними подальші дослідження у напрямку удосконалення алгоритму.

Роботу виконано співробітниками наукових установ без використання бюджетного фінансування.

1. Trump B. Analog linearization of resistance temperature detectors. *Analog Applications Journal*. 2011. 4Q. Pp. 21-24. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slyt442/slyt442.pdf?ts=1675932767222> (дата доступу 03.09.2022)
2. Radetic R., Pavlov-Kagadejev M., Milivojevic N. The analog linearization of Pt100 working characteristic. *Serbian journal of electrical engineering*. 2015. Vol. 12. No 3. Pp. 345-357. DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE1503345R>.
3. Бойко О.В., Чабан О.П., Матвіїв Р.О., Куць В.Р. Терморезистивний перетворювач з аналоговою лінеаризацією. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. № 1. С. 57-62.
4. Sarkar S., Platinum RTD sensor based multi-channel high-precision temperature measurement system for temperature range -100°C to $+100^{\circ}\text{C}$ using single quartic function. *Cogent Engineering*. 2018. 5: 1558687. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1558687>.

- Латенко В.І., Логвиненко Д.М., Миронов Р.Д., Орнатський І.А. Алгоритм та програма розрахунку температури за опором резистивного термодатчика. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2020. № 1. С. 23-27

IMPROVING THE ALGORITHM FOR CALCULATING THE TEMPERATURE OF THE QUASILINEAR RESISTANCE SENSOR PT100

I.V. Herasymenko¹, Іe.O. Zaitsev², V.I. Latenko¹, R.D. Myronov¹, I.A. Ornatsky¹, S.O. Fil¹

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute of the SES of Ukraine and NAS of Ukraine,
Nauky Ave., 37, Kyiv, 03028, Ukraine.

E-mail: lat3185@gmail.com.

²Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: zaitsev@i.ua.

The paper investigates iterative algorithms for solving the equation according to the Kalendar-Van Dusyn formula, which describes the dependence of the electrical resistance of the Pt100 family sensor on temperature. This family of platinum sensors is considered quasi-linear, but for high-precision measurements the nonlinearity of the sensor cannot be neglected, so it is necessary to solve the nonlinear equation of Pt100. At minus temperatures, the equation according to the Kalendar-Van Dusyn formula reaches the fourth power and has no solution with respect to temperature in an analytical form. The analysis of the previously published iterative algorithm for the approximate solution of the equation reveals a disadvantage of this algorithm. The residual error of the solution is not a monotonic function of the argument, because it contains extrema, moreover, the sign of the error changes to the opposite after each extremum. The purpose of this study was to obtain an algorithm that provides the residual error in the form of a monotonic deterministic function of the argument with the minimization of the maximum error value. The possibility to modify the iterative algorithm-prototype in an elementary way by fixing the number of iterations is shown. The residual error of solving the equation according to the modified algorithm has the form of a monotonic deterministic function of the argument. It is assumed that any iterative calculation algorithm can be improved in this way. At the same time, the minimization of the error values of the modified algorithm is achieved by setting the maximum number of iterations compared to the prototype algorithm. To overcome this disadvantage of the modified algorithm, a new algorithm is proposed, in which, in addition to a fixed number of iterations, the property of the smallness of the components of higher degrees is used. The high efficiency of the new algorithm is shown, which reduces the residual error of the solution to a negligible value in just four iterations. It is claimed that the high efficiency of the new algorithm makes further research in the direction of its improvement unnecessary. The article presents a scheme of the new algorithm and a corresponding program on the VBA platform for Excel, which is suitable for direct use in the software of temperature meters based on Pt100 resistance temperature sensors. References 5, figures 4, tables 3.

Keywords: quasilinear, algorithm, program, equation, iteration, sensor, temperature, error.

- Trump B. Analog linearization of resistance temperature detectors. *Analog Applications Journal*. 2011. 4Q. Pp. 21-24. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slyt442/slyt442.pdf?ts=1675932767222> (accessed at 03.09.2022) (Ukr).
- Radetic R., Pavlov-Kagadejev M., Milivojevic N. The Analog Linearization of Pt100 Working Characteristic. *Serbian journal of electrical engineering*. 2015. Vol. 12. No 3. Pp. 345-357. DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE1503345R>.
- Boyko O.V., Chaban O.P., Matviyev R.O., Kuts V.R. Thermoresistive converter with analog linearization. *Vymiriunalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnyh protsesah*. 2013. No 1. Pp. 57-62. (Ukr).
- Sarkar S., Platinum RTD sensor based multi-channel high-precision temperature measurement system for temperature range -100°C to $+100^{\circ}\text{C}$ using single quartic function. *Cogent Engineering*. 2018. 5: 1558687. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1558687>.
- Latenko V.I., Logvynenko D.M., Myronov R.D., Ornatsky I.A. Algorithm and program for calculating the temperature by resistance of the resistive temperature detector. *Vymiriunalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnyh protsesah*. 2020. No 1. Pp. 23-27. (Ukr).

Надійшла 06.10.2022

Остаточний варіант 06.02.2023