УДК 621.52

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Бондарчук М. В.

Київський національний університет технологій та дизайну

В даній статті описана залежність опору термістора від температури. Проведено аналіз схемотехнічних методів лінеаризації залежності опору термісторів від температури, що застосовуються в промисловості для вимірювання температури. Описано позитивні та негативні якості термісторів. Запропоновано метод лінеаризації залежності опору термістора від температури за допомогою методу узгодження показників по трьом точкам.

Ключові слова: *терморезистор, термістор, похибка, лінеаризація, вимірювання, резистор*

Необхідність вимірювання та контролю температури є обов'язковою частиною сучасної промисловості. Неможливо уявити будь-який промисловий об'єкт де дана задача не виконувалась би, чи не мала своєї важливої ролі при виробництві. Хоча контроль температури і не здається складним за виконанням але різноманітність умов що можуть супроводжувати дану задачу ускладнює конфігурування самої системи. Наприклад, при вимірюванні температур напівпровідниковими терморезисторами, які використовують при високих температурах, тисках та різноманітних кліматичних умовах, часто проблема з'являється на етапі нормуючого перетворення характеристики, так як напівпровідникові терморезистори є елементами з нелінійною характеристикою і тому для їхньої лінеаризації використовуються різноманітні рішення. Ці рішення можуть бути як цифровими, беручи до уваги розвиток сучасної електронно обчислювальної техніки, так і схемними. Звертаючи уваги на другий тип рішення проблеми лінеаризації нелінійної характеристики напівпровідникових терморезисторів варто зазначити їхнє дотеперішнє розповсюдження через простоту, дешевизну та надійність, але конфігурація та обрання такої схеми може сильно різнитися через характеристику обраного напівпровідникового терморезистора так і через потрібний розмах вимірюваної температури. Тому дослідження методів такої лінеаризації нелінійних характеристик напівпровідникових терморезисторів є актуальною темою

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

для роботи, що може спростити роботу та зменшити час на обрання схемного рішення лінеаризації.

Постановка завдання

Дослідження в цій науковій статті було зроблене для вибору оптимального рішення на лінеаризацію нелінійного елементу на прикладі термістору, що забезпечило б необхідними даними щодо похибки при різних схемних рішеннях.

Результати досліджень

Потреба вимірювання температури та управління нею виникає в багатьох сферах діяльності людини. А основними вимогами до результатів вимірювання та управління, як завжди, виявляються швидкість і точність, незалежно від того, де використовується прилад – в побуті або в промисловості. В основі будь-якого вимірювання, в тому числі і температури, покладений датчик, і як елемент першого порядку він визначає техніко-економічні показники системи контролю в цілому. Застосування того чи іншого виду термочутливого елемента знову ж таки залежить від вимог, що пред'являються до системи в цілому, і не говорить про повну перевагу одного датчика над іншими. Усе більше застосування знаходять датчики інтегрального виконання, мають низьку нелінійність вихідної характеристики від температури і досить малу вартість, але саме інтегральне виконання є ахіллесовою п'ятою цих елементів через обмеженість робочого температурного діапазону. Інша справа – терморезистори з негативним ТКО (температурний коефіцієнт опору, або NTC – Negative Temperature Coefficient) – вони мають досить великий діапазон робочих температур, можливість віддаленого моніторингу, діють в сильних магнітних полях. Але є недоліки, такі як складна повторюваність і сильна нелінійність температурної характеристики, що в свою чергу ускладнює і підвищує вартість всього виробу. Об'єктом дослідження є NTC терморезистор B57861, методика дослідження якого побудована на основі літератури [1]. Його загальні параметри приведені на рис.1.

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

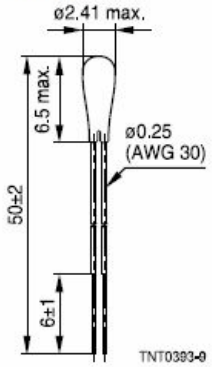
Applications
- Temperature measurement

Features
- Short response time
- High measuring accuracy
- Tight B value tolerances available
- Epoxy resin encapsulation
- PTFE-insulated leads of silver-plated nickel wire, AWG 30
- Different lead length available (50 mm and 350 mm)
- UL approval (E69802)

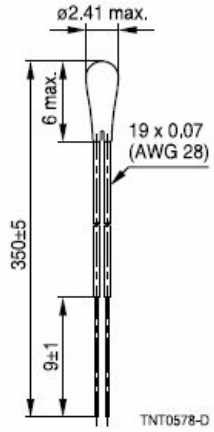
Options
- Alternative lead lengths on request

Delivery mode
Bulk

Dimensional drawings
Length
50 mm



350 mm



Dimensions in mm

General technical data

Climatic category	(IEC 60068-1)		55/155/56	
Max. power	(at 25 °C)	P_{25}	60	mW
Resistance tolerance		$\Delta R_R/R_R$	±1, ±3, ±5	%
Rated temperature		T_R	25	°C
Dissipation factor	(in air)	δ_{th}	approx. 1.5	mW/K
Thermal cooling time constant	(in air)	τ_c	approx. 15	s
Heat capacity		C_{th}	approx. 22.5	mJ/K

Рис.1. **Загальні параметри терморезистору B57861**

Таблиця 1

Залежність опору термістору B57861 від температури

Температура, T°C	Опір, R кОм
0	32,65
5	25,39
10	19,9
15	15,71
20	12,49
25	10
30	8,057
35	6,531
40	5,327
45	4,369
50	3,603
55	2,986
60	2,488
65	2,083
70	1,752
75	1,481
80	1,258

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

Продовження таблиці 1

85	1,072
90	0,9177
95	0,7885
100	0,68
105	0,5886
110	0,5112
115	0,4454
120	0,3893
125	0,3417
130	0,3009

Так як залежність термісторів від температури суттєво нелінійна – це не дозволяє на пряму з'єднувати їх із вторинними перетворювачами. Тому необхідна корекція температурних характеристик за допомогою коректуючих резисторів. При використанні відомої схеми лінеаризації на рис. 3, за допомогою шунтуючого та допоміжного резисторів потрібно розрахувати та отримати параметри загального опору схеми.

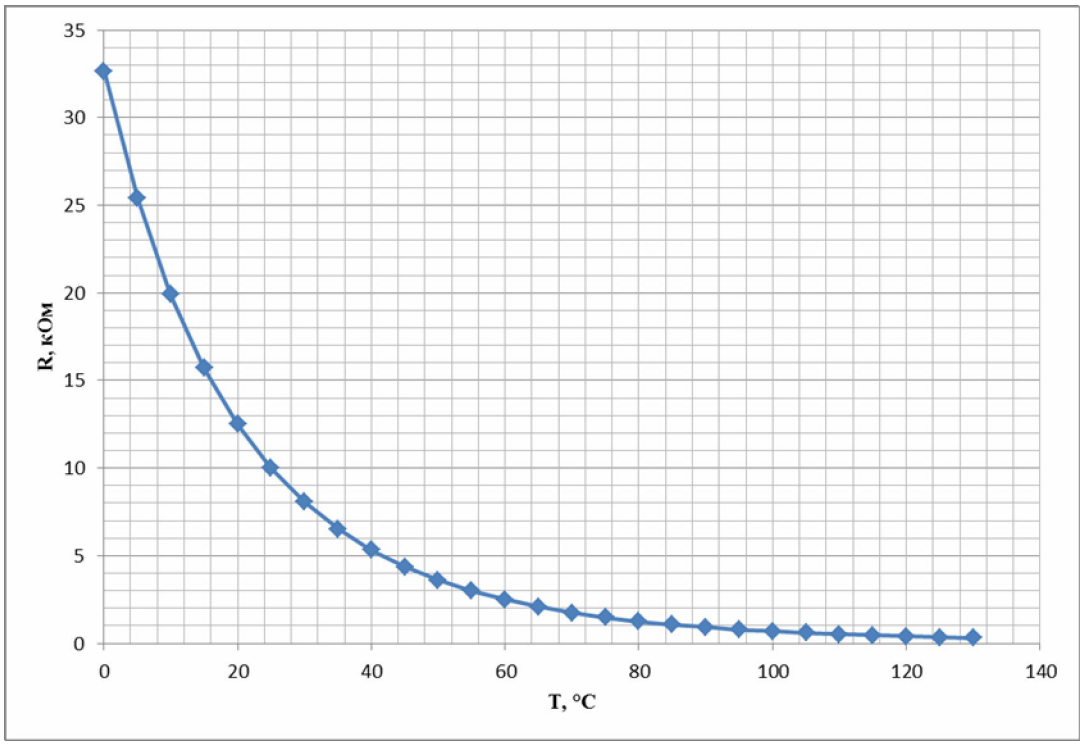


Рис. 2. **Залежність опору терморезистору B57861 від температури**

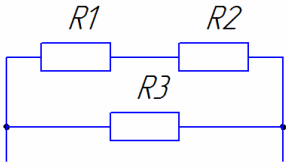


Рис. 3. **Схема лінеаризації з паралельним та послідовним підключенням резисторів:** R_1 – термістор; R_2 – допоміжний резистор; R_3 – шунтуючий резистор

В даній схемі загальний опір знаходиться за формулою:

$$R_{заг} = \frac{R_3(R_1+R_2)}{R_1+R_2+R_3}. \quad (1)$$

Проведемо лінеаризацію функції залежності опору термістору B57861 від температури, де з'єднаємо початок та кінець діапазону.

Після вирішення системи рівнянь в двох відомих точках ми отримаємо таку залежність.

$$y = -0{,}2488 \times X + 32{,}65. \quad (2)$$

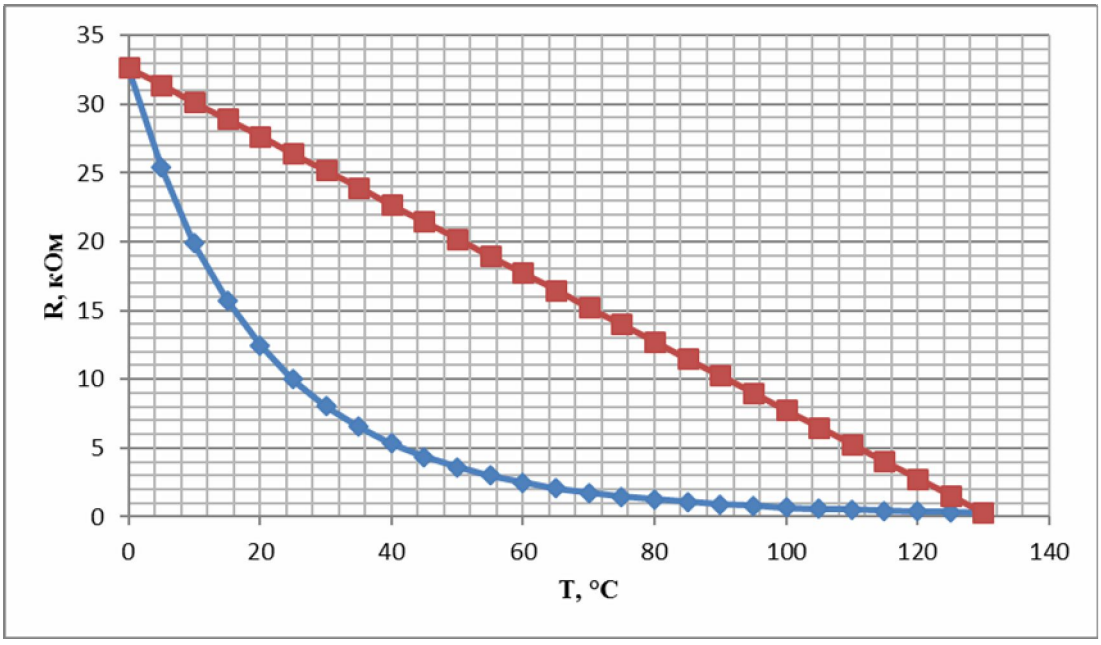


Рис.4. **Залежність опору термістору B57861 від температури та лінійна апроксимація**

Як видно з розрахунків, результати яких вказані в табл. 2, похибка занадто велика і, як видно з графіку на рис. 4, являється односторонньою. Потрібно провести лінеаризацію за допомогою шунтуючого та допоміжного резисторів, використовуємо відомий метод, який описаний вище.

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

Таблиця 2

Залежність опору термістору B57861 від температури

Температура, T°C	Опір, R кОм	Опір, Ra кОм	ΔR кОм	δ, %
0	32,65	32,65	0,0000	0
5	25,39	31,406	6,0158	19
10	19,9	30,162	10,2616	32
15	15,71	28,917	13,2074	41
20	12,49	27,673	15,1832	47
25	10	26,429	16,4290	51
30	8,057	25,185	17,1278	53
35	6,531	23,941	17,4096	54
40	5,327	22,696	17,3694	54
45	4,369	21,452	17,0832	53
50	3,603	20,208	16,6050	51
55	2,986	18,964	15,9778	49
60	2,488	17,72	15,2316	47
65	2,083	16,475	14,3925	44
70	1,752	15,231	13,4793	42
75	1,481	13,987	12,5061	39
80	1,258	12,743	11,4849	36
85	1,072	11,499	10,4267	32
90	0,9177	10,254	9,3368	29
95	0,7885	9,0103	8,2218	25
100	0,68	7,7661	7,0861	22
105	0,5886	6,5219	5,9333	18
110	0,5112	5,2777	4,7665	15
115	0,4454	4,0335	3,5881	11
120	0,3893	2,7893	2,4000	7
125	0,3417	1,5451	1,2034	4
130	0,3009	0,3009	0,0000	0

Проведемо узгодження за двома точками (в точці 35 °C та в точці 100 °C). Для цього потрібно розв'язати систему рівнянь підставляючи відомі величини загального опору та опору термістора в даних точках.

Перепишемо вираз 1 в більш зрозумілий вид.

$$R_{заг} = \frac{R_ш(R_t+R_д)}{R_ш+R_t+R_д}. \quad (3)$$

Проведемо над рівнянням математичні перетворення щоб виразити невідомі:

$$R_{заг} = \frac{R_ш(R_t+R_д)}{R_ш+R_t+R_д}. \quad (4)$$

$$R_{заг} \times (R_ш + R_t + R_д) = R_ш(R_t + R_д). \quad (5)$$

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

$$R_{заг}R_ш + R_{заг}R_t + R_{заг}R_д = R_ш(R_t + R_д). \quad (6)$$

$$R_{заг}R_ш - R_ш(R_t + R_д) = -R_{заг}R_t - R_{заг}R_д. \quad (7)$$

$$R_ш \times (R_{заг} - R_t + R_д) = -R_{заг}R_t - R_{заг}R_д. \quad (8)$$

$$R_ш = \frac{R_{заг}R_t + R_{заг}R_д}{-R_{заг} + R_t - R_д}. \quad (9)$$

Також потрібно знайти значення допоміжного резистора:

$$R_{заг}R_ш + R_{заг}R_t + R_{заг}R_д = R_ш R_t + R_д R_ш. \quad (10)$$

$$R_{заг}R_д - R_д R_ш = R_ш R_t - R_{заг}R_ш - R_{заг}R_t. \quad (11)$$

$$R_д \times (R_{заг} - R_ш) = R_ш R_t - R_{заг}R_ш - R_{заг}R_t. \quad (12)$$

$$R_д = \frac{R_ш R_t - R_{заг}R_ш - R_{заг}R_t}{(R_{заг} - R_ш)}. \quad (13)$$

Для вирішення даної системи рівнянь скористаємося програмою Mathcad. Отримавши значення $R_д$ =10,162 кОм та $R_ш$ =927,21458 кОм розраховуємо значення $R_{заг}$ для всіх значень температури.

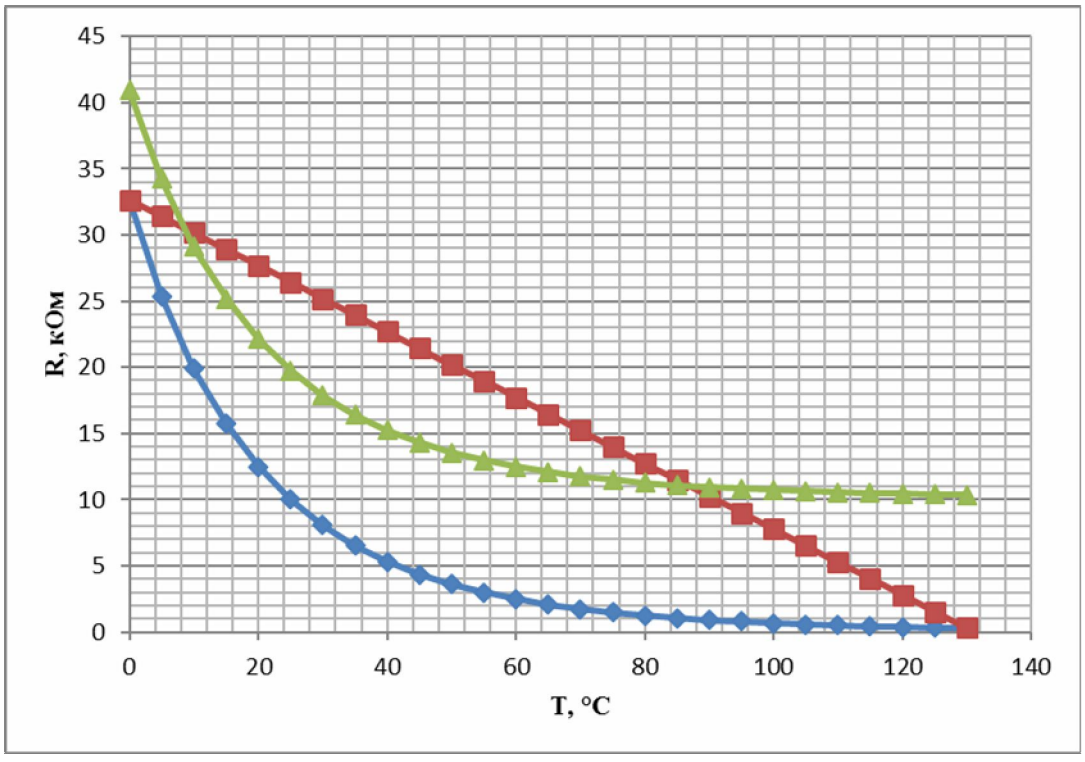


Рис. 5. **Залежність опору термістору B57861 від температури, лінійна апроксимація та лінеаризація за двома точками**

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

Як видно з табл. 3 приведена похибка стала суттєво менша, але цього не достатньо тому пропонується використати новий метод, метод схемної лінеаризації за трьома точками (рис.6) з додаванням додаткового шунтуючого резистора.

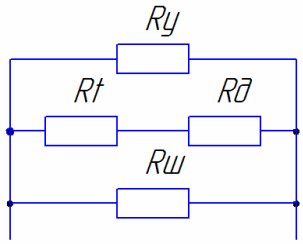


Рис. 6. **Схема лінеаризації з паралельним та послідовним підключенням резисторів та додатковим узгоджуючим резистором:** R_t – термістор; $R_д$ –допоміжний резистор; $R_ш$ – шунтуючий резистор; R_y – шунтуючий резистор

Таблиця 3

Залежність опору лінеаризації за 2 точками від температури

Температура, T°C	Опір, Rл2 кОм	Опір, Ra кОм	ΔR кОм	δ, %
0	40,9228	32,65	8,2728	26
5	34,2394	31,406	2,8336	9
10	29,1182	30,162	1,0434	3
15	25,1700	28,917	3,7474	12
20	22,1121	27,673	5,5611	17
25	19,7332	26,429	6,6958	21
30	17,8682	25,185	7,3166	23
35	16,3981	23,941	7,5426	23
40	15,2348	22,696	7,4616	23
45	14,3071	21,452	7,1452	22
50	13,5639	20,208	6,6441	21
55	12,9644	18,964	5,9994	19
60	12,4800	17,72	5,2396	16
65	12,0857	16,475	4,3898	14
70	11,7631	15,231	3,4681	11
75	11,4989	13,987	2,4882	8
80	11,2813	12,743	1,4615	5
85	11,0998	11,499	0,3989	1
90	10,9491	10,254	0,6947	2
95	10,8230	9,0103	1,8127	6
100	10,7170	7,7661	2,9509	9
105	10,6277	6,5219	4,1058	13
110	10,5520	5,2777	5,2743	16
115	10,4877	4,0335	6,4542	20
120	10,4329	2,7893	7,6436	24
125	10,3863	1,5451	8,8412	27
130	10,3464	0,3009	10,0455	31

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

В даній схемі загальний опір знаходиться за формулою:

$$R_{заг} = \frac{R_ш + R_д + R_t}{R_ш(R_д + R_t)} + \frac{1}{R_у}. \quad (14)$$

Проведемо узгодження за трьома точками (в точці 0 °С, в точці 65 °С та в точці 130 °С). Для цього потрібно розв'язати систему рівнянь підставляючи відомі величини сумарного опору та опору термістора в даних точках. Для вирішення даної системи рівнянь скористаємося програмою Mathcad. Отримавши значення $R_д$ = 6,592 кОм, $R_ш$ = 8,294 кОм та $R_у$ = 0,038 кОм, та розрахувавши значення $R_{заг}$ для всіх значень температури можна зробити висновок, що запропонований метод забезпечує кращі показники лінеаризації. Що ми можемо бачити оцінивши приведені похибки на рис. 7 та табл. 4, в якій можна порівняти похибки за трьома способами.

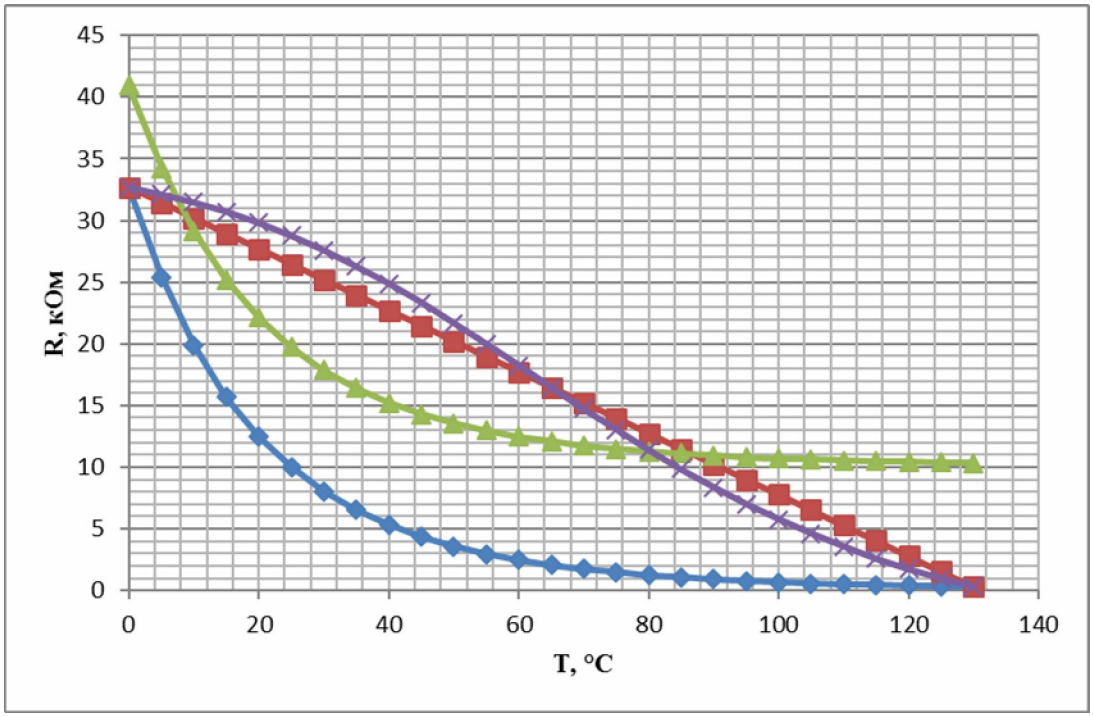


Рис. 7. **Залежність опору термістору B57861 від температури, лінійна апроксимація, лінеаризація за двома та за трьома точками**

Таблиця 4

Залежність приведеної похибки вимірювання від температури

Температура, T°C	δ без лін., %	δл2, %	δл3, %
0	0	26	0
5	19	9	2
10	32	3	4
15	41	12	6
20	47	17	7

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

Продовження таблиці 4

25	51	21	7
30	53	23	7
35	54	23	7
40	54	23	7
45	53	22	6
50	51	21	5
55	49	19	3
60	47	16	2
65	44	14	0
70	42	11	2
75	39	8	3
80	36	5	4
85	32	1	5
90	29	2	6
95	25	6	6
100	22	9	6
105	18	13	6
110	15	16	5
115	11	20	4
120	7	24	3
125	4	27	2
130	0	31	0

Порівняння розкиду величин похибок можна розглянути на рис. 8, де для наочності розкиду графік представлений полярним.

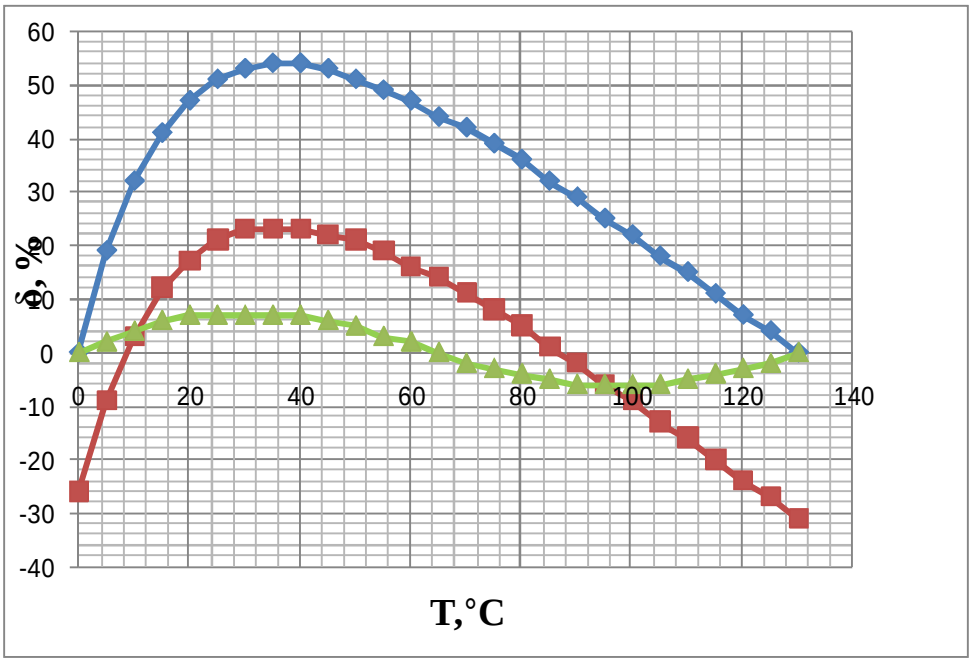


Рис. 8. **Залежність приведеної похибки вимірювання від температури, без лінеаризації, з лінеаризацією за двома та за трьома точками**

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

Звісно даний метод має максимальну приведену похибку в межах 7%, але при цьому ми маємо вже досить непогану точність для певних видів вимірювання температури, наприклад, такі рішення можуть застосовуватися для узгодження давача з мостовою схемою [2], при цьому вартість та простота схеми є неабиякою перевагою.

Висновки

Отже, при використанні методу лінеаризації за трьома точками легко добитися досить низького рівня приведеної похибки, це дає змогу здешевити та удосконалити схемотехнічні рішення, що використовуються для вимірювання температури з використанням термісторів.

Основні переваги використання даного методу:

- дешевизна та доступність компонентів;
- мінімальні розміри;
- немає потреби в додатковому живленні;
- мале значення похибки у порівнянні з іншими методами.

Недоліки використання даного методу:

- присутня похибка;
- складний розрахунок резисторів;
- при деяких параметрах функція має екстремум, тому значення резисторів буває від'ємним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шалимова К. В. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / Шалимова К. В. – М. : Высшая школа,1968. – 464 с.
2. Фандеев Е. И. Согласование характеристик термопреобразователя сопротивления и автоматического моста разных градуировок / Фандеев Е. И., Лущаев Г. А., Карчков В. А. – Изв. вузов. Электромеханика, 1980. – С. 1126-1130.

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015

Бондарчук М. В.

Анализ методов линеаризации характеристик нелинейных элементов

Киевский национальный университет технологий и дизайна

В данной статье описана зависимость сопротивления термистора от температуры. Проведен анализ схемотехнических методов линеаризации зависимости сопротивления термистора от температуры, применяемые в промышленности для измерения температуры. Описаны положительные и отрицательные качества термисторов. Предложен метод линеаризации зависимости сопротивления термистора от температуры с помощью метода согласования показателей по трем точкам.

Ключевые слова: *терморезистор, термистор, погрешность, линеаризация, измерения, резистор*

Bondarchuk M. V.

Analysis of linearization's methods of nonlinear elements

Kiev National University of Technology & Design

In this article described the dependence of thermistor resistance on temperature. The analysis methods linearization circuit thermistor resistance depending on the temperature used in industry for measuring the temperature. Describe the positive and negative characteristics thermistor. The method of linearization of thermistor resistance depending on the temperature using the method of coordination indicators for the three points.

Keywords*: thermistor, measurement error, linearization, measurement, resistor*

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2015