

Похибка вимірювання зі збільшенням довжини лінії зв'язку та при розширенні частотного діапазону зростає, тому гостро постає питання розроблення методів компенсації впливу параметрів системи первинний перетворювач – лінія зв'язку – вхідні кола вимірювального блоку на результат вимірювання температури шумовим термометром.

1. Параметри лінії передачі шумового сигналу./ Озгович А.І., Стадник Б.І., Серкіз А.В., Микитин І.П. // Вісн. ДУ "Львівська політехніка" 1997, № 298. С. 68-71.  
2. Стан і перспективи розвитку шумової термометрії / Озгович А., Стадник Б., Микитин І. // "Контроль і

управління в технічних системах" (КУТС-97), Книга за матеріалами четвертої науково – технічної конференції м. Вінниця, 21-23 жовтня 1997 р. 3. Манченко А.В., Стадник Б.І., Гордов А.Н., Куритный И.П., Столярчук П.Г., Термошумовой преобразователь для измерения температуры с повышенной точностью // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.: Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов. Харьков, 1983. Т.2. С.229. 4. Геращенко О.А., Гордов Н.А., Лах В.И., Стадник Б.И., Ярышев Н.А. Температурные измерения:Справочник. К., 1984. 5. А. ван дер Зил. Шумы при измерениях. М., 1983.

УДК 518.5+531.781.2

## ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕРМОМЕТРІВ З ТЕРМОДІОДНИМИ СЕНСОРАМИ

© Володимир Василюк\*, Анатолій Ленюченко, Петро Малачівський, 2000

\*Державне підприємство магістральних нафтопроводів "Дружба", вул. Липинського, 12, Львів-МСП, 79000, Україна

Львівський національний університет ім. Івана Франка, вул. Університетська 1, Львів, 79000, Україна

*Розглядається задача калібрування цифрових термометрів з термодіодними сенсорами. Пропонується методика розрахунку температурної характеристики термодіодного сенсора з використанням фізико-математичної моделі представлення спаду напруги на р-п переході. Ця методика дозволяє за двома реперними температурними точками (наприклад, 0 °С і 100 °С) з достатньою точністю відтворити температурну характеристику сенсора. Запропоновано спосіб оптимальної схемної лінеаризації характеристик даних сенсорів цифрових термометрах.*

*Рассматривается задача калибровки цифровых термометров с термодиодными сенсорами. Предлагается методика расчета температурной характеристики термодиодного сенсора с использованием физико-математической модели представления падения напряжения на р-п периоде. Методика позволяет по двум температурным точкам (например, 0 °С и 100 °С) с достаточной точностью воспроизвести температурную характеристику сенсора. Предложен способ оптимальной схемной линейаризации характеристик данных сенсоров в цифровых термометрах.*

*We consider the problem calibrating the digital thermometers with thermal semiconductors. A method of temperature characteristic calculation for the thermal semiconductor sensor using a physico-mathematical model of p-n-transition voltage gap representation is proposed. This method allows to recover with sufficient the precision temperature characteristics given two repairing points (e.g. 0 °С and 100 °С). We offer a method of optimal schema linearisation of the above sensors' characteristics in digital thermometers.*

Проектуючи засоби вимірювання температури, важливо вибрати тип сенсора, який би відповідав потрібним технічним вимогам, був легкодоступним і недорогим. З цього погляду привертають увагу сенсори на основі кремнієвого р-п переходу. У разі правильного вибору типу і режиму роботи р-п

переходу такі сенсори відзначаються часовою стабільністю характеристик і досить високою чутливістю [1]. Відносно мала нелінійність і невисока ціна цих термосенсорів роблять їх конкурентоспроможними. Але застосування таких сенсорів ускладнюється розкидом їх параметрів, що

вимагає індивідуального градування, пов'язаного з доволі громіздким і недешевим процесом, який базується на використанні не завжди доступних еталонних засобів та високоточних термостатів. Тому була розроблена методика, за допомогою якої вдалося з достатньою точністю відтворити температурну характеристику сенсора на основі кремнієвого р-п переходу за двома температурними точками. Як такі контрольні точки доцільно вибирати точки, що легко відтворюються, наприклад,  $-0^{\circ}\text{C}$  і  $100^{\circ}\text{C}$ . Розроблення саме такої методики й розглянуто у даній роботі.

Запропонована методика ґрунтується на застосуванні фізико-математичної моделі термосенсора на р-п переході [2]

$$U_{\text{p}}(T) = -\frac{\Theta(T)(T-T_0)}{T_0} + \frac{2kT}{q} \ln \frac{\sqrt{I_{R_0}^2 + 4I_{S_0} I_{\text{p}}} - I_{R_0}}{2I_{S_0}} + r_{\frac{3}{2}}(T) I_{\text{p}}, \quad (1)$$

де

$$r_{\delta}(T) = r_{\delta_0} \ln(1 + \delta(T)) / \delta(T); \quad (2)$$

$$\delta(T) = 0,0003846T + 1,118019;$$

$I_{R_0}$  і  $I_{S_0}$  – відповідно струм рекомбінації і насичення при температурі  $T_0 = 300^{\circ}\text{K}$ ;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура;  $q$  – заряд електрона;  $U_{\text{np}}$  – напруга на прямозміщеному р-п переході;  $I_{\text{np}}$  – струм через р-п перехід;  $r_{\delta_0}$  – нормувальний множник.

Залежність значення  $\Theta(T)$  від температури незмінна для конкретного типу термодіодів і визначається шириною забороненої зони  $\varphi_3(T)$  і коефіцієнтом  $m(T)$ , що враховує дрейфову складову струму, за формулою

$$\Theta(T) = m(T) \vartheta_T \varphi_3(T), \quad (3)$$

де

$$\varphi_3(T) = \varphi_{300} - G(T)(T - 300); \quad \varphi_{300} = 1,12[\text{V}]; \quad (4)$$

$$m(T) = 0,00053846T + 0,965227; \quad \vartheta_T = 1.$$

Температурний коефіцієнт забороненої зони  $G(T)$  можна описати апроксимаційною залежністю

$$G(T) = G_{300} + k_G(T - 300), \quad (5)$$

де

$$G_{300} = 3,20654 \cdot 10^{-4} [\text{V}/\text{г\deltaад}];$$

$$k_G = 7,692308 \cdot 10^{-7} [\text{V}/\text{г\deltaад}^2].$$

Ця залежність лінійно апроксимує коефіцієнт забороненої зони  $G(T)$  в діапазоні температур  $[300\text{K}; 473\text{K}]$ .

З моделі (1) виходить, що при фіксованому струмі через р-п перехід спад напруги на ньому залежить від опору бази  $r_{\delta}(T)$  і струмів  $I_{R_0}$  і  $I_{S_0}$ . Зміна опору бази  $r_{\delta}(T)$  з точністю до масштабного множника  $r_{\delta_0}$  визначається залежністю (2). Отже, залежність напруги на р-п переході від температури можна подати в такому вигляді

$$U_{\text{np}}(T) = -\frac{\Theta(T)(T-T_0)}{T_0} + \frac{2kT}{q} A + r_{\delta_0} \frac{\ln(1 + \delta(T))}{\delta(T)} I_{\text{np}}, \quad (6)$$

де невідомі  $r_{\delta_0}$  і параметр  $A$ , що враховує струми  $I_{R_0}$  і  $I_{S_0}$ .

Значення параметрів  $r_{\delta_0}$  і  $A$  не залежать від температури і згідно з формулою (6) їх можна визначити за двома експериментальними контрольними точками температурної характеристики.

Отже, маючи для температур  $T_1$  і  $T_2$  відповідні значення вихідних напруг  $U_{\text{np}}(T_1)$  і  $U_{\text{p}}(T_2)$  сенсора, параметри  $r_{\delta_0}$  і  $A$  знаходять із формул

$$A = \frac{q(\Psi(T_2) - \Psi(T_1))}{2k(T_2/\Phi(T_2) - T_1/\Phi(T_1))}; \quad (7)$$

$$r_{\delta_0} = \Psi(T_1) - A \frac{2kT_1}{q\Phi(T_1)}, \quad (8)$$

де

$$\Phi(T) = \frac{\ln(1 + \delta(T))}{\delta(T)} I_{\text{np}};$$

$$\Psi(T) = \left( U_{\text{пр}}(T) + \frac{\Theta(T)(T - T_0)}{T_0} \right) / \Phi(T),$$

а значення  $\delta(T)$  – із виразу (2).

Запропонована модель була перевірена для великої кількості сенсорів. Результати розрахунків характеристик за описаною методикою для трьох зразків сенсора наведені в таблицях 1-3. У цих таблицях:  $T$  – значення температури напівпровідникового сенсора за робочим еталоном темпе-

ратури;  $U_{\text{пре}}(T)$  – напруга на прямому р-п переході, виміряна еталоном цифровим вольтметром;  $U_{\text{прм}}(T)$  – напруга на прямозмщеному р-п переході розрахована з використанням моделі (1);  $\Delta U_{\text{пр}}(T)$  – розбіжність між експериментальною і теоретичною температурними характеристиками сенсора;  $\Delta T$  – та ж розбіжність в температурному еквіваленті. В цих таблицях затемненням виділено по дві реперні точки, за якими проводилось відтворення теоретичних характеристик сенсорів.

Таблиця 1

T [°C]	$U_{\text{пре}}(T)$ [V]	$U_{\text{прм}}(T)$ [V]	$\Delta U_{\text{пр}}(T)$ [V]	$\Delta T$ [°C]
-30.21	0.7585	0.759056	-5.559E-04	-0.279
-20.13	0.7384	0.7389693	-5.693E-04	-0.282
-10.39	0.7188	0.7193138	-5.137E-04	-0.252
0	0.6981	0.6981	0	0
20.79	0.6551	0.654976	1.239E-04	0.059
35.18	0.6249	0.6246773	2.227E-04	0.105
50.23	0.593	0.592672	3.281E-04	0.153
84.44	0.5191	0.5191	0	0
139.4	0.4023	0.4004271	1.873E-03	0.876
155.8	0.3673	0.3653847	1.915E-03	0.905
170.5	0.3362	0.3342796	1.920E-03	0.908

Таблиця 2

T [°C]	$U_{\text{пре}}(T)$ [V]	$U_{\text{прм}}(T)$ [V]	$\Delta U_{\text{пр}}(T)$ [V]	$\Delta T$ [°C]
-30.03	0.7651	0.765599	-4.990E-04	-0.257
-20.04	0.7452	0.7462205	-1.021E-03	-0.519
-10.2	0.7259	0.7268844	-9.844E-04	-0.495
0	0.7066	0.7066	0	0
20.7	0.6642	0.6647677	-5.677E-04	-0.277
35.19	0.6345	0.6350315	-5.315E-04	-0.256
50.27	0.6036	0.6037657	-1.656E-04	-0.078
84.44	0.5321	0.5321	0	0
139.4	0.4148	0.4163555	-1.555E-03	-0.747
155.9	0.3808	0.3819797	-1.179E-03	-0.572
170.5	0.3497	0.351865	-2.165E-03	-1.049

Під час виробництва цифрових термометрів лінеаризація температурних характеристик сенсорів добре реалізується за допомогою запропонованого авторами методу компенсаційного зв'язку [3]. Вихідний цифровий код  $N$  аналого-цифрового

перетворювача з компенсуючим зв'язком визначається за формулою

$$N = \frac{N_1 \cdot U_{\text{вх}}(T)}{U_{\text{он}} + B \cdot U_{\text{вх}}(T)}, \quad (9)$$

де  $N_1$  – масштабний коефіцієнт, що залежить від тактової частоти і при конкретній реалізації приймається таким, що дорівнює деякій константі;  $U_{вх}(T)$  – сигнал на вході АЦП, задається температурною характеристикою термодіодного сенсора;  $U_{он}$  – опорна напруга;  $B$  – коефіцієнт передачі сигналу  $U_{вх}(T)$  в коло компенсаційного зв'язку. Цей метод завдяки визначенню оптимальних значень параметрів компенсаційного зв'язку (опорної напруги  $U_{он}$  і коефіцієнта  $B$ ) дозволяє зменшити

похибку нелінійності характеристики сенсора в заданому діапазоні до найменшого можливого значення. Використання цієї методики дає змогу за температурною характеристикою термодіодного сенсора, відтвореною моделлю (6) таблиці 1-3, визначити оптимальні значення параметрів компенсаційного зв'язку опорної напруги  $U_{он}$  і коефіцієнта  $B$ . За цими значеннями знаходять номінали схеми компенсаційного зв'язку. Для ілюстрації на рисунку наведена схема реального термометра.

Таблиця 3

T [°C]	$U_{пр\epsilon}(T)$ [V]	$U_{пр\mu}(T)$ [V]	$\Delta U_{пр}(T)$ [V]	$\Delta T$ [°C]
-30.04	0.7559	0.7560561	-1.560E-04	-0.078
-20.06	0.7357	0.7362862	-5.862E-04	-0.292
-10.18	0.7158	0.7164642	-6.642E-04	-0.327
0	0.6958	0.6958	0	0
20.57	0.6521	0.6533855	-1.285E-03	-0.615
30.24	0.6337	0.6331811	5.189E-04	0.246
40.55	0.612	0.6114815	5.186E-04	0.245
50.31	0.5903	0.5908095	-5.095E-04	-0.239
69.95	0.5487	0.5489111	-2.111E-04	-0.098
79.81	0.5273	0.5277666	-4.666E-04	-0.217
89.519	0.5069	0.5068999	0	0
139.3	0.4002	0.4000256	1.74433E-04	0.082
155.4	0.3649	0.3658139	-9.139E-04	-0.434
170.6	0.3319	0.333831	-1.931E-03	-0.9176

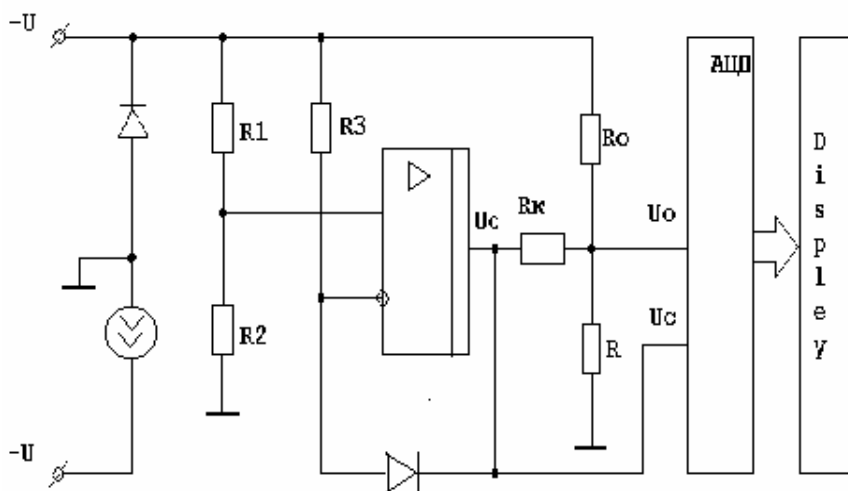


Схема реального термометра

Схема компенсаційного зв'язку в термометрі, поданому на рисунку, реалізують на резисторах  $R_0$ ,  $R_k$ ,  $R$ . Номінали цих резисторів визначають за формулами

$$R_0 = R(E(1-B) - U_{on})/U_{on}; \quad (10)$$

$$R_k = \frac{R_0 R (1-B)}{B(R_0 + R)}, \quad (11)$$

де  $E$  – еталонна напруга, з якої формується опорна напруга  $U_{on}$ . Значення  $E$  і  $R$  задаються для конкретної реалізації.

Для розрахунку номіналів резисторів схеми компенсаційного зв'язку термометра, зображеного на рисунку, розроблено відповідне програмне забез

печення. Це програмне забезпечення дає змогу за двома точками температурної характеристики конкретного термодіодного сенсора відтворити його характеристику в потрібному діапазоні, розрахувати відповідні оптимальні параметри компенсаційного зв'язку і за їх значеннями знайти номінали резисторів  $R_0$ ,  $R_k$ ,  $R$ . Переважно, отримані в такий спосіб номінали резисторів забезпечують задані параметри схеми.

У табл. 4 наведені розраховані за допомогою цього програмного забезпечення оптимальні номінали резисторів схеми розглянутих зразків термодіодних сенсорів для  $E=6.5[V]$  і  $R=1[kOm]$ .

Таблиця 4.

Зразок	$U_{on}[V]$	$B$	$R_0[kOm]$	$R_k[kOm]$
1	0.207801	0.01628104	58.457	29.770
2	0.202468	0.01670980	56.981	30.567
3	0.206593	0.01637849	58.115	29.947

**Висновки.** На основі фізико-математичної моделі розроблено методику розрахунку температурної характеристики термодіодного сенсора. Запропонована методика дозволяє у разі заміни сенсора в практичних умовах оперативно встановити значення резисторів у схемі компенсаційного зв'язку і тим самим відновити калібровку термометра. Для цього вистачить двох реперних температурних точок нового сенсора, наприклад,  $0^\circ C$  і  $100^\circ C$ .

1. Фогельсон И.Б., Бондаренко Е.В., Кравец Э. Ф. Исследование стабильности термотранзисторов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРИО, 1977, Вып. 2.  
2. Василюк В.М. Принципи побудови високоточних температурних сенсорів на основі р-п – переходу // Вимірювальна техніка, 1998. № 53. С. 70-76.  
3. Василюк В.М., Леновенко А.М., Малачівський П.С. Лінеаризація цифрових вимірювальних пристроїв з нелінійними сенсорами // Вісн. 1999. № 366. С. 118-122.