

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя

*Кафедра приладів і контрольно-вимірювальних систем*

# **МЕТОДИ І ЗАСОБИ СПРЯЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ СЕНСОРІВ У МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ**

Конспект лекцій

для студентів спеціальностей 8.05100306 –  
«Інформаційні технології в приладобудуванні» та  
8.05100302 – «Прилади і системи точної механіки»



Тернопіль 2015

Паламар М.І., Пастернак Ю.В., Стрембіцький М.О. Методи і засоби спряження температурних сенсорів у мікропроцесорних вимірювальних комплексах. Конспект лекцій для студентів спеціальностей 8.05100306 – «Інформаційні технології в приладобудуванні» та 8.05100302 – «Прилади і системи точної механіки». – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – 73 с.

Конспект лекцій містить опис поширених сенсорів температури та методів, функціональних і принципових електричних схем вузлів включення сенсорів для використання їх у прецизійних системах вимірювання та керування. Призначені для допомоги у проектуванні апаратної частини вимірювально-керуючих систем мехатроніки на основі мікроконтролерів, програмованих логічних інтегральних схем та ПЕОМ.

Служать для підвищення ефективності проведення лабораторно-практичних занять і самостійного вивчення дисциплін «Інформаційні технології в приладобудуванні», «Мікропроцесори і ЕОМ», «САПР засобів вимірювання», «Основи проектування систем штучного інтелекту», «Автоматизовані системи опрацювання вимірювальної інформації» та ін.

Укладачі: д.т.н., доц. Паламар М.І.  
Пастернак Ю.В.  
Стрембіцький М.О.

Конспект лекцій розглянутий та схвалений на засіданні кафедри  
Приладів і контрольно-вимірювальних систем

Протокол № від 2015 р.

Схвалено методичною радою факультету ФРК

Протокол № від 2015 р.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ТЕРМОМЕТРИ НА <i>pn</i> -ПЕРЕХОДАХ.....	5
2. ІНТЕГРАЛЬНІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ.....	13
3. ТЕРМОПАРИ.....	21
4. КАЛІБРУВАННЯ ТЕРМОМЕТРІВ.....	33
5. РЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ.....	38
6. ІНШІ СПОСОБИ ВИМІРУ ТЕМПЕРАТУРИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

## ВСТУП

Для потокового контролю й регулювання температури різних процесів широко використовуються найрізноманітніші датчики температури. Так, у харчовій промисловості для забезпечення високої якості харчових продуктів необхідно контролювати температурно-тимчасові цикли їхньої обробки. Дослідників, що працюють в автомобільній промисловості, цікавить температура в циклах стиску і вихлопу двигунів. Точні виміри температури вимагаються для забезпечення максимальної тепловіддачі в перетворювачах сонячної енергії. Виміри температури сприяють ощадливій витраті енергії в побуті і на виробництві. У заданих межах повинна підтримуватися температура в лікарняних інкубаторах для немовлят.

Існує безліч способів виміру температури самими різними датчиками, робота яких заснована на різних принципах. Якщо пристрій містить датчик температури й інших необхідних компонентів, що забезпечують відображення значення температури, те цей пристрій називається термометром. На рис. 7.1 приведена структурна схема електронного термометра, об'єднаного з ЕОМ і контролером. У цій главі ми обговоримо термометри на *pn*-переходах, а також термопарні і термісторні термометри, широко використовувані у вимірювальній техніці. Будуть також описані деякі інші типи електронних термометрів.

# 1. ТЕРМОМЕТРИ НА *pn*-ПЕРЕХОДАХ

Ефект залежності властивостей *pn*-переходу від температури, небажаний у більшості застосувань, можна з успіхом використовувати для виміру температури. Датчики на *pn*-переходах характеризуються лінійною залежністю вихідного сигналу від температури, Але, як і всякі напівпровідникові пристрої, працюють тільки в обмеженому інтервалі температур.

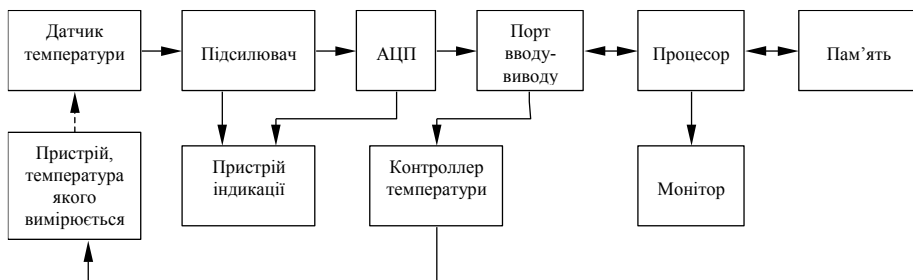


Рис. 1.1. Структурна схема електронного термометра

## 1.1 Принцип роботи діодного термометра

На рис. 1.2 зображена вольт-амперна характеристика кремнієвого діода для середніх значень струмів. Прямий струм діода визначається виразом

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right], \quad (1.1)$$

де  $I$  — струм через діод;  $V$  — прикладена напруга;  $I_s$  — зворотний струм насичення (функція температури);  $k$  — постійна Больцмана;  $q$  — величина заряду електрона.

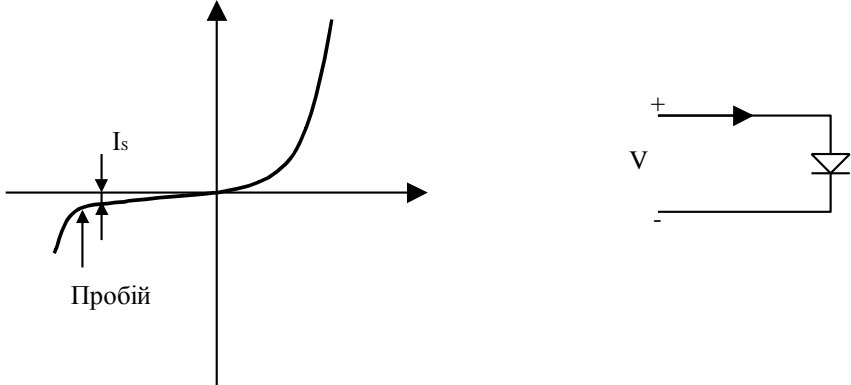


Рис. 1.2. Вольт-амперна характеристика кремнієвого діода

Виконуючи в рівнянні (1.1) відповідні підстановки і розв'язавши його відносно  $V$ , одержуємо

$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{4,6kT}{q} (\ln M - \ln I) \quad (1.2)$$

де  $M$  — деяка незалежна від температури константа і  $E_g$  — ширина забороненої зони в кремнії при  $T = 0 \text{ K}$ . Згідно (1.2), напруга на діоді лінійно залежить від температури. На рис. 1.3 представлені температурні залежності цієї напруги для чотирьох різних діодів, що випускаються фірмою Fairchild Semiconductor.

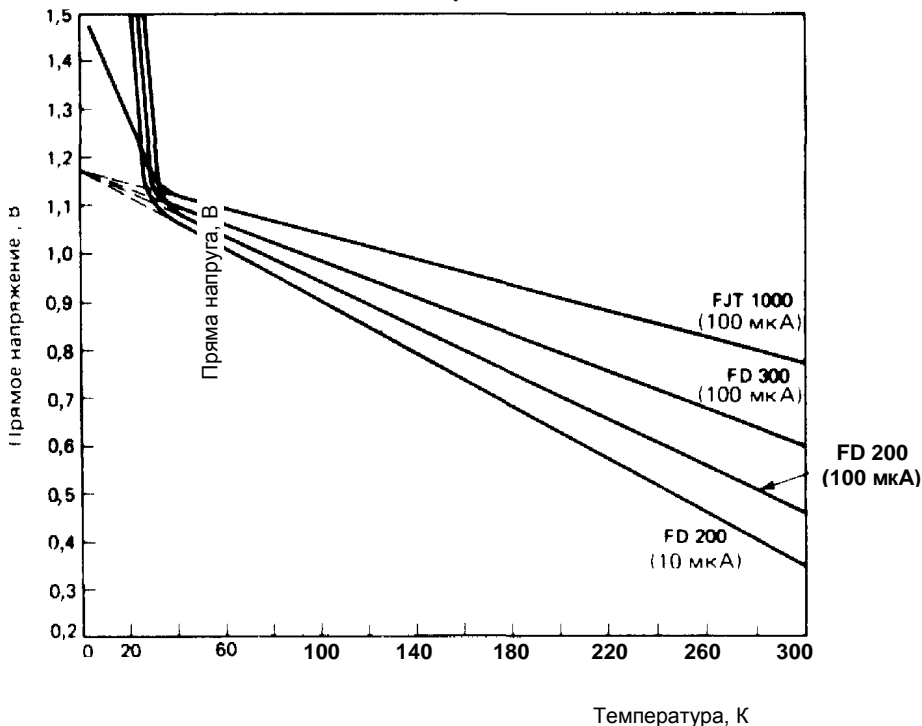


Рис. 1.3. Температурні характеристики кремнієвих діодів фірми Fairchild Semiconductor.

Робочий інтервал температур — від 40 до 400 К

1.2 Термометр на діоді з відомими характеристиками

На рис. 1.4 показаний взаємозв'язок температури і напруги база — еміттер  $V_{BE}$  для включеного діодом транзистора МТ 105 фірми Motorola. Щоб одержувати точні значення вимірюваної температури, необхідно

відкалібрувати діод [22]. Процедура калібрування полягає в наступному.

1. Визначаються значення  $V_{BE}$  на границях робочого інтервалу температур (наприклад, при  $T = -40^{\circ}\text{C}$  і  $T = 150^{\circ}\text{C}$ ), як показано на мал. 7.4.

2. Будується графік лінійної залежності  $V_{BE} - V_{BE}(T_x)$  з використанням двох значень  $V_{BE} : V_{BE}(-40^{\circ}\text{C})$  і  $V_{BE}(150^{\circ}\text{C})$ .

3. Обчислюється значення  $T_c = -2,25 + 0,0033 \times (V_{BE} - 600)$  мВ/ $^{\circ}\text{C}$ .

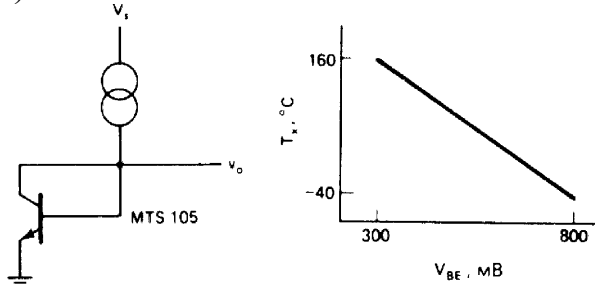


Рис. 1.4. Температурна залежність напруги база - емітер для включеного діодом транзистора МТ 105 фірми Motorola.

4. Температура  $T_x$ , що відповідає будь-якому вимірному значенню  $V_{BE}(T_x)$ , розраховується по наведеній у наступному пункті формулі чи визначається з графіка (пункт 2).

$$5. T_x = [V_{BE}(T_x) - V_{BE}(25^{\circ}\text{C})] / T_c + 25.$$

Оскільки напруга на діоді є функцією струму, у датчику необхідно використовувати високостабільне джерело струму. Вимірювану напругу можна подати на вхід АЦП і після розрахунків за допомогою ЕМВ одержати значення  $T_x$ . Діоди мають кращу чутливість і



лінійність на більшій частині свого робочого діапазону в порівнянні з термопарними і резисторними термометрами. Вони придатні для багатьох застосувань, але менш повторювані. Діодні термометри не слід використовувати при наявності сильних магнітних полів (великих 1...2 Тл). Точність цих термометрів  $\pm 1^\circ\text{C}$ . У літературі описаний прецизійний діодний термометр на GaAs, що забезпечує точність  $\pm 0,002\text{ K}$  в інтервалі температур 14 ... 300 K [18].

1.3 Термометр на діоді з невідомими характеристиками

Щоб одержувати точні значення температури, потрібно відкалібрувати діод у необхідному інтервалі температур. Калібрування здійснюється шляхом зміни температури (наприклад, від 0 до  $50^\circ\text{C}$ ) і реєстрації кожної пари значень  $V_i, T_i$ . Після калібрування діода по будь-якому вимірюваному значенню  $V_x$  можна знайти відповідне значення  $T_x$  на кривій  $V_i(T_i)$ . Другий можливий підхід полягає у використанні лінійної апроксимації для залежності  $V = V(T)$ . Представимо цю залежність у виді

$$T = a + b, \quad (1.3)$$

де  $a$  і  $b$  — підлягаючі визначенню константи:

$$T_i = a + bV_i, \quad (1.4)$$

вирішуючи рівняння (7.4) для двох різних температур, одержуємо значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$ . Потім при будь-якому заданому  $V_x$  можна розрахувати відповідне значення  $T_x$  по формулі (1.3).

## 1.4 Транзистор як датчик температури

Транзистор також є гарним датчиком температури. При фіксованому струмі колектора напруга база — емітер транзистора лінійним чином залежить від температури, тобто так само, як і пряма напруга на діоді. На рис. 1.5(д) представлена схема термометра з використанням як датчика транзистора MTS 105.

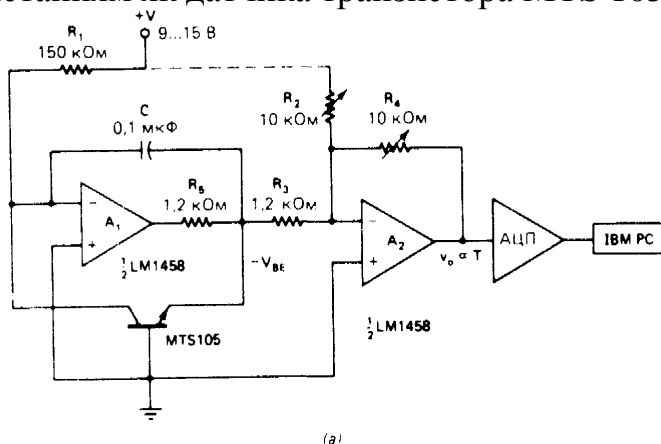


Рис. 1.5. Принципова <sup>(a)</sup> схема транзисторного термометра

Програма мовою СІ для калібрування і використання транзисторного термометра. Ця програма використовується з макетною платою, конструкція якої обговорюється в гл. 3, 4 і 5.

Резистор  $R_1$  визначає колекторний струм транзисторного датчика. Цей резистор повинний мати високу стабільність і низький температурний коефіцієнт опору (наприклад, металоплівковий резистор). Операційні підсилювачі  $A_1$  і  $A_2$  повинні мати

малий дрейф (типу LM1458). На виході ОП  $A_1$  буде діяти напруга  $V_{BE}$ . Ця напруга підсилюється ОП  $A_2$ . За допомогою потенціометра  $R_4$  регулюється коефіцієнт підсилення цього ОУ для підтримки вихідного сигналу в межах границь насичення. Якщо в схему ввести потенціометр  $R_2$ , то вихідний сигнал можна буде відкалібрувати  $v_0 = 0$  при  $T = 0^\circ\text{C}$ . Якщо ж калібрування здійснюється програмно, то цей потенціометр не потрібний. Елементи  $R_5$  і  $Z$  запобігають самозбудженню схем. Напруга живлення  $+V$  повинна бути дуже стабільною.

Для калібрування транзисторний датчик занурюється в крижану ванну, і за допомогою потенціометра  $R_2$  встановлюється напруга  $v_0 = 0$ , що відповідає індикації температури в градусах Цельсія. Точність цього термометра  $\pm 0,01^\circ\text{C}$  в інтервалі температур від  $-50$  до  $+125^\circ\text{C}$ . Потенціометр  $R_4$  — регулятор посилення схеми (величини вихідної напруги). Калібрування в потрібній точці води і використання прецизійної схеми забезпечують точність  $\pm 0,01^\circ\text{C}$  з врахуванням нелінійності і довгострокової нестабільності [1].

Вихідна напруга  $v_0$  подається на вхід АЦП, що знаходиться в IBM PC на платі збору дані фірми Testar Lab Master. На мал. 7.5(6) приведена БЕЙСІК-программа калібрування датчика при  $0$  і  $100^\circ\text{C}$ . Підпрограма в рядках 250—310 ініціалізує АЦП шляхом завантаження коду 80(14) у порт 714(H) керуючого байта, вибирає канал  $0$  шляхом завантаження  $0$  у порт 715(H) і запускає АЦП шляхом

завантаження 1 у порт 716(H). У рядку 300 перевіряється вміст СЗР порту 714. Під час роботи АЦП цей розряд встановлений у 0. По завершенні перетворення відбувається перехід у стан логічної 1.

На рис. 1.5(в) приведена програма мовою СІ для калібрування і використання термометра з макетною платою, що обговорювалася в гл. 3, 4 і 5.

## 2. ІНТЕГРАЛЬНІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ

На рис. 2.1 показана проста термочутлива схема, використувана для одержання вихідної напруги, пропорційної абсолютній температурі. Для ідентичних кремнієвих транзисторів  $Q_1$  і  $Q_2$ , нехтуючи їхніми базовими струмами в порівнянні зі струмами колекторів, одержуємо

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{E1}}{I_{E2S}} = \frac{\exp(qV_{BE1}/2kT)}{\exp(qV_{BE2}/2kT)},$$

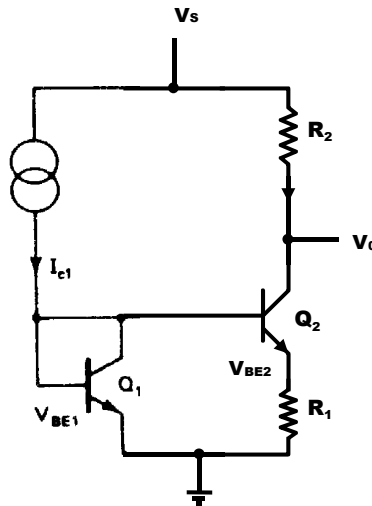


Рис. 2.1. Термочутлива схема з вихідною напругою, пропорційною абсолютній температурі

$$V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right),$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} + I_{C2} R_1,$$

$$R_1 I_{C2} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right),$$

Ясно, що спад напруги на резисторі  $R_1$  пропорційний абсолютній температурі і змінюється лінійно, поки відношення  $I_{C1}/I_{C2}$  залишається постійним. Цей спосіб контролю температур реалізований у ІС Е.Х5700 фірми National Semiconductor. Робочий інтервал температури — від -55 до +125°С, чутливість - 10 мВ/°С. Постійна часу дорівнює 50 с (нерухоме повітря) і менш 1 з (масляна ванна, щопереміщується). Вихідна напруга датчика дорівнює 2,98 В при  $T = 298$  К. Точність складає  $\pm 3,8$  К, нелінійність не перевищує  $\pm 1$  К. Цей датчик непридатний для багатьох застосувань через низьку точність [19].

Мікросхеми LM135, LM235 і LM335, що випускаються фірмою National Semiconductor, також є інтегральними датчиками температури, вихідна напруга яких залежить від температури. Вони працюють як двохвивідні стабілітрони, пробивна напруга яких прямо пропорційна абсолютній температурі з коефіцієнтом пропорційності + 10 мВ/К. Диференціальний (чи динамічний) вихідний опір цих датчиків менш 1 Ом, робочий струм може змінюватися в широких межах — від 400 мкА до 5 мА — практично без яких-небудь змін у робочих характеристиках. Калібрування ІС LM135 при 25°С забезпечує максимальну погрішність 1,5°С в інтервалі температур 0... 100°С. Максимальна погрішність більш дешевої ІС LM335 дорівнює 2°С. Робочий інтервал температур для

ІС LM135 — від  $-55$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . На рис. 1.7 показана типова схема включення цих датчиків при вимірах температури. На рис. 7,8 приведені графіки для теплових постійних часу ІС LM335 у повітрі (у статичному стані й у потоці) і в масляній ванні, що перемішується. Вихідний сигнал цієї ІС можна представити у виді

$$v_o(T) = v_o(T_0) \frac{T}{T_0},$$

де  $T$  — невідома температура і  $T_0$  — опорна температура, обидві виражені в градусах Кельвіна. Калібрування вихідного сигналу, що встановлює правильне показання датчика при одній (опорній) температурі, забезпечує правильні показання при всіх інших температурах.

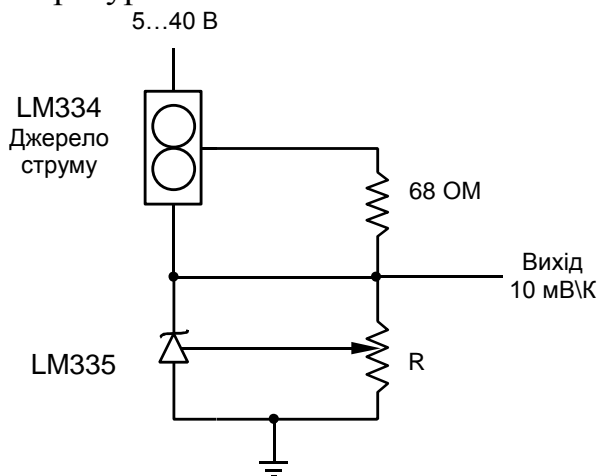


Рис. 2.2 Типова схема використання інтегрального датчика температури ІС LM335 (вихідний сигнал — напруга).

Потенціометр необхідний тільки в тому випадку, коли потрібно реалізувати високоточну відкалібровану вимірювальну схему.

Мікросхема AD590 (фірма Analog Devices) являє собою двохвивідний інтегральний датчик температури з кращою точністю і лінійністю в порівнянні з ІС LM135. Це датчик з струмовим виходом: величина його вихідного струму залежить від абсолютної температури. Датчик нечутливий до величини прикладеної до нього напруги і може використовуватися навіть з довгими сполучними проводами. На рис. 1.9 показана базова термочутлива схема, використовувана для одержання вихідного струму, пропорційного абсолютній температурі.

У цій схемі за умови ідентичності й ідеальності транзисторів  $Q_3$ , і  $Q_4$  токове дзеркало на цих транзисторах забезпечує поділ струму  $I_T$  на два рівних струми  $I_{C1}$  і  $I_{C2}$ . Транзистор  $Q_2$ , складається з восьми паралельно включених транзисторів, кожен із яких ідентичний транзисторові  $Q_1$ . Звідси випливає, що струм  $I_1$  протікаючий через транзистор  $Q_1$  у 8 разів більший струму  $I_2$ , що протікає через кожний із транзисторів, що входять до складу  $Q_2$ . Оскільки різниця  $V_T$  між напругами база — емітер  $V_{BE}$  двох ідентичних транзисторів з різними струмами колекторів пропорційна абсолютній температурі:

$$V_T = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{I_2} = \frac{k}{q} (\ln 8)T = 179T [B],$$



то спадання напруги на резисторі  $R$  також пропорційне абсолютній температурі; отже, аналогічну залежність від температури мають струм  $I_{C2}$  через цей резистор і повний струм через датчик  $I_T = 2I_{C2}$ . При  $R = 358 \text{ Ом}$  одержуємо  $I_T/T = 1 \text{ мка/К}$ .

ІС AD590 реалізована на розглянутому схемотехнічному принципі, але в ній використовується більш складна схема для досягнення високих робочих характеристик. Максимальна погрішність датчика A05901 в інтервалі температур  $0 \dots 100^\circ\text{C}$  з двома підстроюваннями складає менш  $0,3^\circ\text{C}$ . Для датчика AD590M ця погрішність не перевищує  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ . Постійна часу ІС A0590 (у корпусі TE-52) дорівнює  $60 \text{ с}$  у нерухомому повітрі без тепловідводу і  $1,4 \text{ с}$  в маслі, що перемішується.

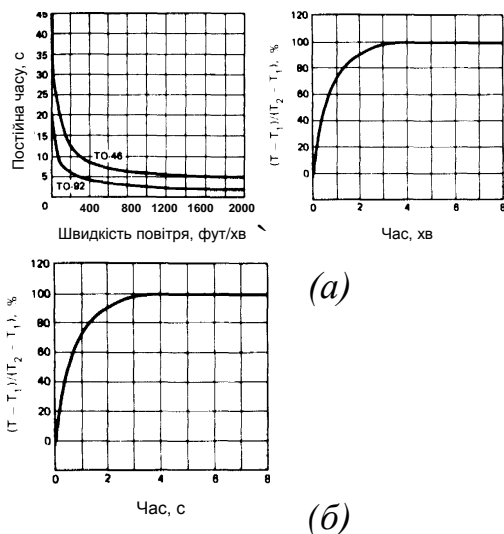


Рис. 2.3. Теплові постійні часу ІС LM335 у повітряному потоці (а), у нерухомому повітрі (б) і в масляній ванні, що перемішується, (в).

На рис 2.3. (а) і (б) теплова постійна дана у відсотках до кінцевого значення.

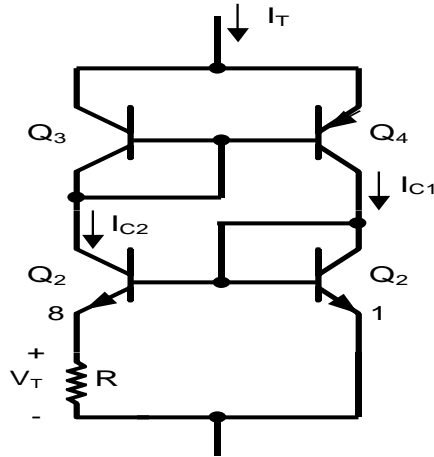


Рис. 2.4. Термочутлива схема, реалізована в ІС А0590, з вихідним струмом, пропорційним абсолютній температурі.

При напругах живлення від 4 до 30 В ІС А0590 діє як стабілізатор струму з високим вихідним опором і вихідним струмом 1 мка/К. При  $T = 298,2$  К вихідний струм дорівнює 298,2 мка. Робочий інтервал температур — від  $-55$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . Високий вихідний опір ( $>10$  МОм) забезпечує відмінне придушення пульсації і дрейфу напруги джерела живлення. Зміна напруги живлення від 5 до 10В приводить до зміни вихідного струму не більше ніж на 1 мка, що еквівалентно погрішності  $1^{\circ}\text{C}$ .

Мікросхеми LM134-3, LM234-3, LM 134-6 і LM234-6 (фірма National Semiconductor), що

представляють собою трьохвивідні регульовані джерела струму, також придатні для використання як інтегральні датчики температури з токовим виходом ІС LM134-3 і LM134-6 використовуються в інтервалі температур  $-55 \dots + 125^{\circ}\text{C}$ , а ІС LM234-3 і LM234-6 — в інтервалі температур  $- 25 \dots + 100^{\circ}\text{C}$ . Усі ці мікросхеми мають три виводи. Вони працюють у широкому діапазоні живлячих напруг від 1 до 40В. Як показано на мал. 7.10, потрібні тільки два проводи для з'єднання датчика з навантажувальним резистором, так що з практичної точки зору припустиме використання довгих сполучних проводів. Вихідний струм  $i_0$  цих ІС прямо пропорційний абсолютній температурі в градусах Кельвіна відповідно до формули

$$i_0 = \frac{(227 \text{ мкВ} / \text{К})(T)}{R}$$

де  $T$  — температура в градусах Кельвіна;  $i_0$  — вихідний струм датчика;  $R$  — опір зовнішнього струмозадаючого резистора. Струм  $i_0$  програмується в межах 1 мкА ... 10 мА шляхом зміни номіналу резистора  $R$ .

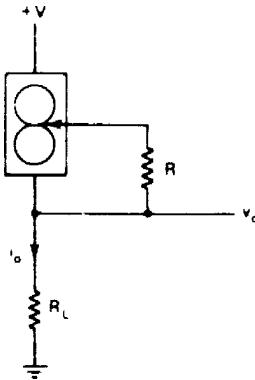


Рис. 2.5 Типова схема використання ІС LM134-3 - датчика температури з струмовим виходом

Точність датчиків на основі ІС LM134-3 і LM234-3 складає  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ; ІС LM134-6 і LM234-6 забезпечують точність  $\pm 6^{\circ}\text{C}$ . Таким чином, ці датчики непридатні для прецизійних вимірів температури.

### 3. ТЕРМОПАРИ

Термопара являє собою пристрій, що складається з двох провідників з різнорідних металів чи сплавів зі звареним контактом на одному з кінців. На рис. 3.1 показані різні типи термопар, пропонувані фірмою Omega Engineering [17]. На рис. 2.12 (а) зображено термопару з відкритим (незахищеним) контактом, виступаючим за межі захисної оболонки. Така термопара з відкритим контактом використовується для виміру температур некорозійних газів (у статичному стані чи в потоці), коли потрібно забезпечити дуже малу постійну часу.

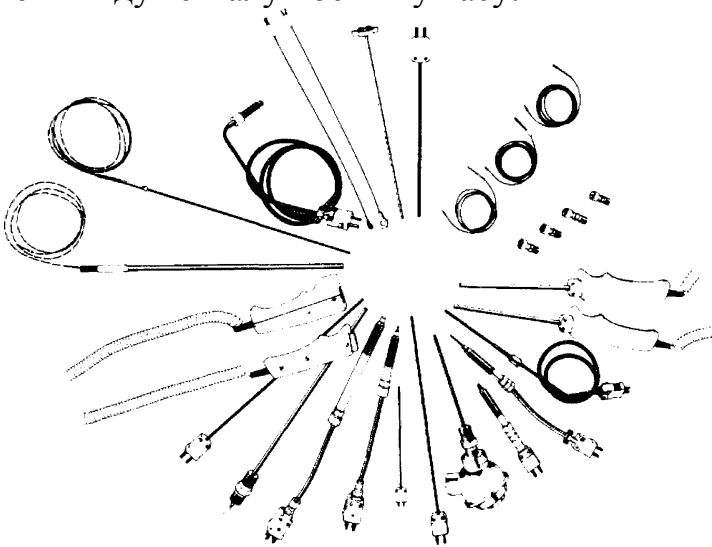


Рис. 3.1 Різні типи термопар, пропонувані фірмою Omega Engineering

На рис. 3.2(б) показана незаземлена термопара, ізольована від захисної оболонки порошком з Mg. Така

незаземлена термопара придатна для проведення вимірів у корозійному середовищі. І, нарешті, на мал. 3.2 (в) показана термопара з заземленим контактом, призначена для виміру температури корозійних газів і рідин (у статичному стані й у потоці), а також для тих застосувань, де використовуються високі тиски.

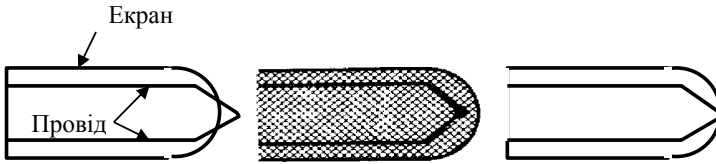


Рис. 3.2 Типи термопар: (а) з відкритим контактом, (б) з незаземленим контактом, (в) із заземленим контактом.

### 3.1 Принципи роботи термопар

Розглянемо ефект Зеебека. На мал. 3.3(а) показані два провідники з різнометалів чи сплавів А і В, з'єднаних один з одним на обох кінцях, так що утворюється замкнутий ланцюг. Якщо температури, при яких знаходяться два отриманих контакти, різні ( $T_2 > T_1$ ), то в цьому замкнутому ланцюзі буде текти струм. Цей струм існує в ланцюзі доти, поки існує різниця в температурах двох контактів. Електрорушійна сила (ЕРС), яка викликає струм, що спостерігається, називається термоЕРС Зеебека. Говорять, що провідник А позитивний стосовно провідника В, якщо струм тече від А к В у більш холодному з двох контактів [10, 26].

Як показано на рис. 3.3(б), термоЕРС можна виміряти за допомогою вольтметра, що включається в

ланцюг, зображений на рис. 7.13(а). Точно так само можна виміряти струм у цьому ланцюзі, включаючи в нього амперметр (рис. 3.3(б)).

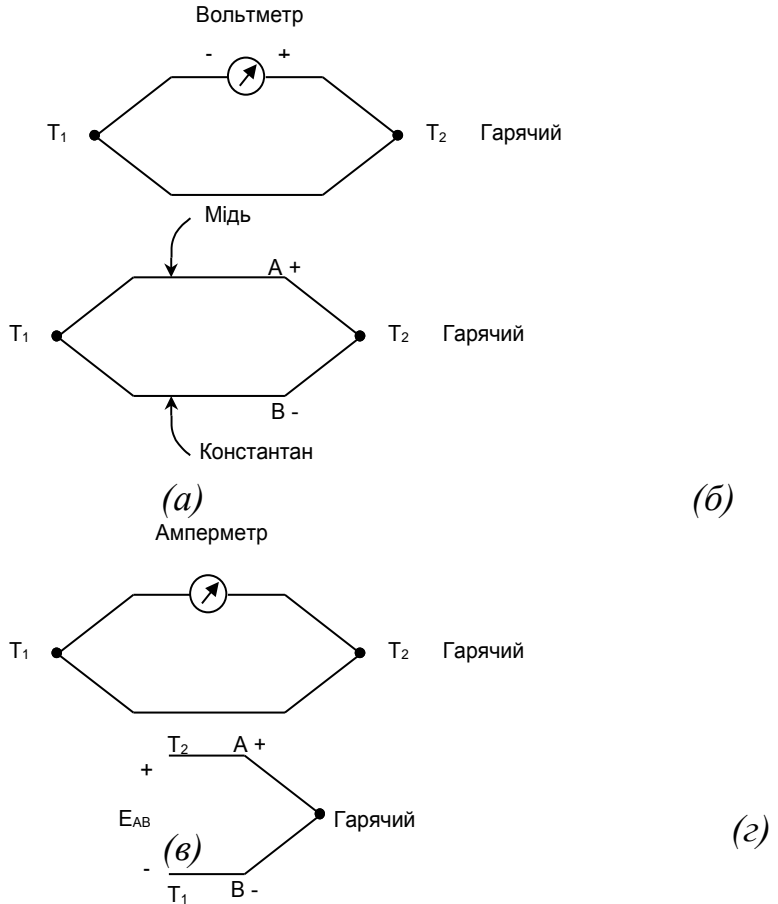


Рис. 3.3. Ефект Зеебека. (а) Базова схема, що ілюструє ефект Зеебека. (б) Вимір ЕДС за допомогою вольтметра, (в) Вимір струму за допомогою амперметра (г) Розрив ланцюга посередині.

Якщо зображений на рис. 3.3(а) замкнутий ланцюг розірвати посередині, як показано на рис. 3.13(г), то

напруга між його розімкнутими вільними кінцями буде функцією різниці між температурою контакту і температурою вільних кінців і, крім того, буде залежати від конкретної комбінації матеріалів двох провідників. Наприклад, якщо  $T_1 = 0^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 1^\circ\text{C}$ , то  $E_{AB} = -39$  мкВ для термопари Т-типу (де Л — мідь, У — константан) і  $= 5$  мкВ для термопари S-типу (А — мідь, У — сплав платини з 10% родію).

### 3.2 Закони термоелектрики

Виміри температури за допомогою термопари засновані на калібруваннях і застосуванні так званих законів термоелектрики, справедливості яких установлена дослідним шляхом. Ці закони дозволяють проаналізувати більшість практичних термопарних ланцюгів [121].

1. *Закон внутрішніх температур.* У ланцюзі, утвореному одним однорідним провідником, наявність градієнта температури не приводить до виникнення електричного струму. На рис. 3.4(а) показані два провідники з різнорідних металів. А й У, контакти яких мають різні значення температури  $T_1$  і  $T_2$ . Градієнти і розподіли температури уздовж провідників, обумовлені температурами  $T_3$  чи  $T_4$  (підтримуваними за рахунок нагрівання чи охолодження відповідних ділянок цих провідників), не впливають на величину термоЕДС.

2. *Закон проміжних провідників (металів).* Два гомогенних провідники з різнорідних металів А і В утворюють ланцюг з контактами, що мають температури  $T_1$  і  $T_2$ , як показано на рис. 3.4(б). Третій провідник Х включається в ланцюг шляхом розриву провідника А,



утворюючи два нових контакти  $J_1$  і  $J_2$ . Якщо температура провідника  $X$  однакова по всій його довжині, то результуюча ЕДС буде точно така ж, як і під час відсутності цього провідника. Це означає, що можна спаювати дві термопари одина з одною, одержуючи ті ж характеристики ланцюга, що і при зварюванні. Крім того, у розрив провідника  $X$  можна включити сполучні проводи від якого-небудь пристрою, не змінюючи характеристик ланцюга, за умови, що контакти  $J_1$  і  $J_2$  будуть знаходитися при одній і тій же температурі.

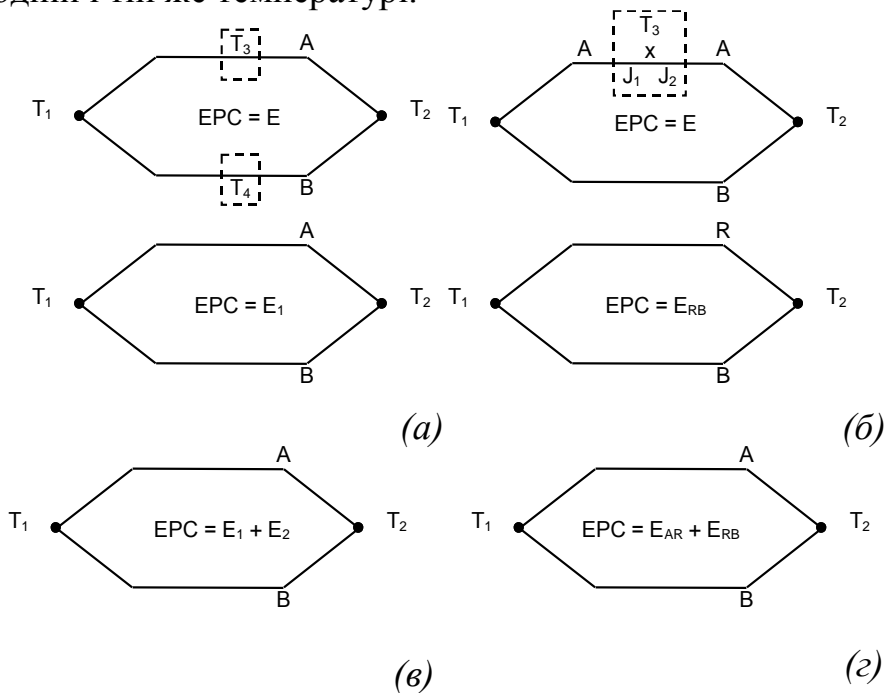


Рис. 3.4. Закони термоелектрики. (а) Закон внутрішніх температур, (б) Закон проміжних металів. (в) Закон проміжної температури. (г) Закон адитивності термоЕРС.

3. Закон проміжної температури. Як показано на рис. 3.4(в), якщо в ланцюзі, утвореному двома гомогенними провідниками із різнорідних металів, індукцірується термоЕРС  $E_1$  при температурах контактів  $T_1$  і  $T_2$  і термоЕРС  $E_2$  — при температурах контактів  $T_2$  і  $T_3$ , те термоЕРС, індукована в тому випадку, коли контакти мають температури  $T_1$  і  $T_3$ , буде дорівнювати  $E_1 + E_2$ . Це означає, що градуїрувальні таблиці можна використовувати навіть при відмінності температури опорного контакту від  $0^\circ\text{C}$ .

4. Закон адитивності термоЕРС. Як показано на рис. 3.4(г), якщо відомі термоЕРС металів А і В стосовно опорного металу R ( $E_{AR}$  і  $E_{RB}$ ), те термоЕРС для комбінації металів А і В дорівнює алгебраїчній сумі  $E_{AR}$  і  $E_{RB}$ . Це означає, що можна створювати ланцюги з нестандартних термопарних комбінацій і як і раніше використовувати для них градуїрувальні таблиці.

### 3.3 Вимір термоЕРС

Якщо ми безпосередньо приєднаємо вольтметр до термопари, зображеної на мал. 7.13(г), то його показники не будуть відповідати фактичному значенню термоЕРС для існуючої різниці температур  $T_1$  і  $T_2$ . Це зв'язано з тим, що виходи вольтметра самі утворять новий термоелектричний ланцюг, як це добре видно з рис. 3.5. Контакт  $J_2$  — це контакт міді з міддю; він не створює ніякий термоЗДС ( $V_2 = 0$ ). Однак контакт  $J_3$  — це контакт міді з константаном, що буде додавати деяку ЕРС  $V_3$ , протилежну за знаком ЕРС  $V_1$ . Показники вольтметра пропорційні різниці термоЕРС  $V_1$  і  $V_3$  різниці температур  $T_1$  і  $T_3$ . Для визначення невідомої температури  $T_1$  по напрузі  $\Delta V$ , вимірюваній вольтметром, потрібно знати температуру  $T_3$ .

Температура  $T_1$  є деяка функція  $F$  від  $V_1 - V_3$ , а напруга  $\Delta V$  — деяка функція  $G$  від  $T_1 - T_3$ :

$$T_1 = F(V_1 - V_3) = F(\Delta V), \quad (7.5)$$

$$\Delta V = G(T_1 - T_3). \quad (7.6)$$

Якщо контакт  $J_3$  помістити в крижану ванну, то для цього випадку вираз (7.6) перетвориться до виду  $\Delta V = G(T_1)$ . Тепер  $\Delta V$  залежить тільки від температури  $T_1$  контакту  $J_1$ .

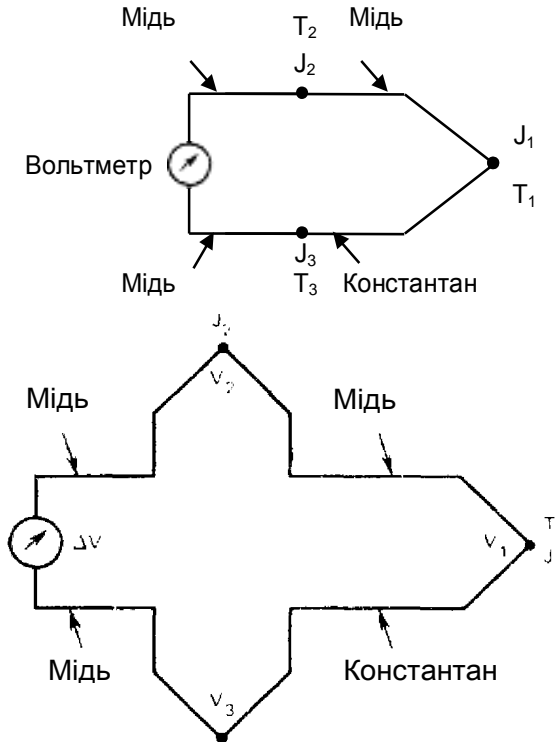


Рис. 3.5. Вимір ЕРС термопарі. (а) Безпосереднє підключення вольтметра до термопарі. (б) Еквівалентна схема ланцюга (о).

На практиці зовсім не обов'язково поміщати контакт  $J_3$  у крижану ванну. Замість цього можна ввести в ланцюг деяку напругу, протилежну за знаком ЕРС  $V_3$ , що компенсує  $V_3$  і забезпечить рівність вимірюваної напруги й термоЕРС  $V_3$ . Цей прийом називається методом компенсації холодного контакту. На мал. 7.16 показана схема компенсації холодного контакту для термопари Т-типа. Компенсація термопари Т-типа (мідь — константан) забезпечується за рахунок спадання напруги протилежної (стосовно ЕРС термопари) полярності на резисторі  $R_A$ , ця напруга індукціюється вихідним струмом  $I_A$  напівпровідникового датчика температури AD590. При збільшенні температури  $T_A$  холодного контакту термоЕРС  $V_A$  зростає на величину  $\Delta V_A$  і одночасно зростає струм  $I_A$  датчика AD590. Основна частина струму  $I_A$  протікає через резистор  $R_A$ , і збільшення струму  $\Delta I_A$  викликає збільшення спадання напруги  $\Delta V$  на цьому резисторі, що компенсує збільшення  $\Delta V_A$  у термоЕРС холодного контакту. Напруга  $E_0$  дорівнює термоЕРС  $V_T$ , що нам потрібно знати, і не залежить від  $V_A$  - ІС AD580 — джерело стабілізованої опорної напруги 2,5 В.

$$E_0 = V_T - V_A + \frac{I_A \cdot 40,2 \text{ Ом} + 2,5 \text{ В}}{1 + 40,2 \text{ Ом} / R} - 2,5 \text{ В} = V_T .$$

На рис. 3.7 наведена більш проста реалізація компенсації холодного контакту з використанням ІС AD595. Ця ІС має вбудовані засоби компенсації холодного контакту і посилення, а також виявлення

ушкодження ланцюга. Компенсація холодного контакту досягається шляхом детектування температури в самій ІС і відповідної корекції вихідної напруги. ІС виробляє вихідну напругу  $10 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$ .

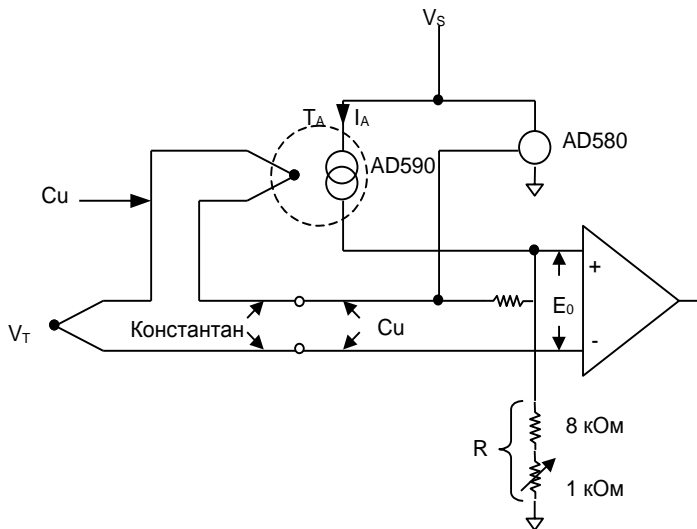


Рис 3.6. Схема компенсації холодного контакту (спаю) для термопари Т-типу [22].

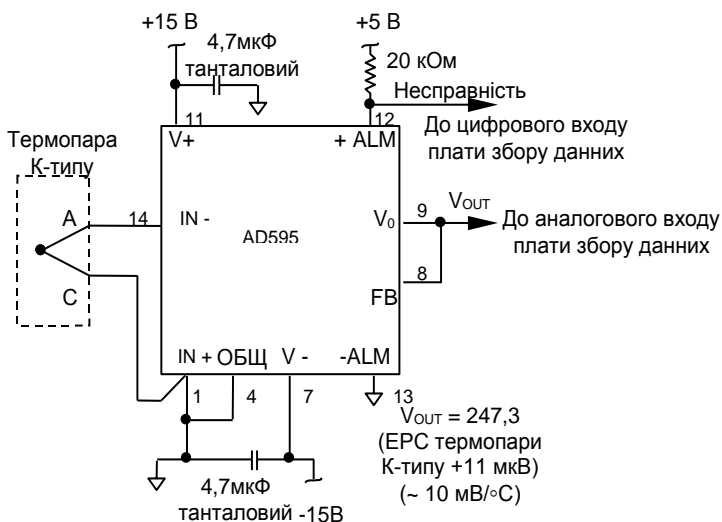
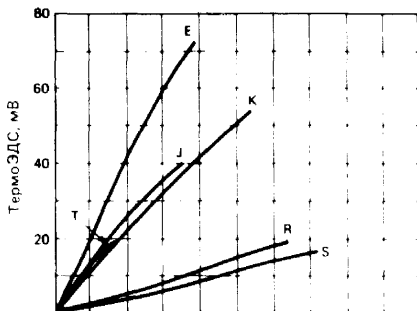


Рис. 3.7. Компенсація холодного контакту для термопары К-типу [13]: А — алюмель, С— хромель

### 3.4 Перетворення термоЕРС у температуру

Температура й ЕРС термопары зв'язані слабонелінійною залежністю. Графіки вихідних напруг для шести стандартних термопар як функції температури наведені на мал. 7.18. Термопара К-типу характеризується практично лінійною залежністю  $V = V(T)$  в інтервалі температур від 0 до 1000°C. Для досягнення хорошої точності при використанні термопарного термометра весь діапазон робочих температур повинний бути відкалібрований. Можна було б скласти довідкову таблицю для залежності

напруги від температури і закласти її в пам'ять IBM PC. Однак, якщо приходить ся мати справу із широким діапазоном температур, така довідкова таблиця займає занадто великий об'єм пам'яті.



Тип	Метали	
	+	-
E	Хромель – константан	
J	Залізо – константан	
K	Хромель - алюмель	
R	Платина – платина + 13%	
S	родію	
T	Платина – платина + 10%	
	родію	
	Мідь - константан	

Рис. 3.8. Залежність термоЕРС від температури для шести типових термопар. (З дозволу фірми Omega Engineering Inc.)

Інший підхід полягає у використанні деякої апроксимації для залежності напруги від температури, наприклад, поліноміального наближення

$$T = A_0 + A_1X + A_2X^2 + A_3X^3 + \dots + A_nX^n,$$

де  $T$  — температура;  $X$  — вихідна напруга термопари;  $A_i$  — коефіцієнт полінома (свій набір для кожної термопари);  $n$  — порядок полінома. При збільшенні  $n$  поліпшується точність поліноміального наближення. Фактичне значення  $n$  визначається за допомогою довідкових таблиць по термопарах [2], виходячи з потрібної точності.



## 4. КАЛІБРУВАННЯ ТЕРМОМЕТРІВ

Для того щоб гарантувати точність виміру температури, необхідно реалізувати можливості еталонів опорної температури. Ця реалізація припускає використання апаратури і відповідних процедур, що дозволяють виконати калібрування працюючих вимірювальних пристроїв по еталонах температури таким способом, що забезпечує мінімальну погрішність.

Забезпечення точного виміру температури — дуже важливе завдання. У багатьох випадках життя і здоров'я піддавалися б "ризик", устаткування виходило би з ладу, а продукти псувалися, якщо не підтримувалася б необхідна температура. І зовсім неважливо, наскільки точні виміри й уважний оператор, якщо вимірювальний пристрій не відкалібрований належним чином — результат буде далеким від істини.

Можна вказати чотири правила, виконання яких найбільше важливо для забезпечення хороших результатів калібрувальної процедури.

*Правило 1.* Необхідно домагатися того, щоб умови установки термочутливого елемента при калібруванні були максимально близькі до умов його фактичного використання. Ступінь занурення, оточуюча температура, наявність екрана і корпусу — усі ці фактори можуть впливати на потік тепла навколо термочутливого елемента і, отже, на його калібрування.

*Правило 2.* Апаратура, використувувана для калібрування, зовнішні впливи і проведені процедури повинні вносити мінімально можливу погрішність.

*Правило 3.* Точність зразкового опорного термометра повинна бути значно вище тієї точності, що реалізує калібруємий термометр; найкраще, якщо погрішність зразкового термометра буде в 5—10 разів менше припустимої погрішності калвіруємого термометра. Це означає, що для калібрування термометрів чи пристроїв контролю температури з максимальною очікуваною погрішністю  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  потрібно використовувати зразковий термометр із максимальною погрішністю не більш декількох десятих градуса; щоб погрішність відкаліброваного термометра була менше ніж  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , зразковий термометр повинний мати максимальну погрішність не більш декількох сотих градуса і т.д.

*Правило 4.* Необхідно гарантувати точність показників самого зразкового термометра. Це досягається шляхом порівняння його показників з первинним зталоном температури (точка танення льоду чи потрійна точка води) чи використання термометра, повторно відкаліброваного в Національному бюро стандартів (NBS) чи у відповідній метрологічній лабораторії. Методи й апаратура, необхідні для виконання калібрування з точністю  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ , більш докладно розглядаються в роботі [7].

## 4.1 Зниження шумів термопар

Оскільки вихідна напруга термопар дуже мало (мікрівольти), вона дуже відчутна до перешкод. Тому при використанні термопар необхідно застосовувати різні способи послаблення перешкод. Для поліпшення якості сигналу термопар можна застосувати активний аналоговий фільтр, описаний у гл. 1, і техніку захисного екранування, описану в гл. 2.

### **Теплова постійна часу**

Теплова постійна часу залежить від конкретного компонування вимірювальної системи з погляду ефективності теплопередачі і від характеристик оточуючого середовища. Як правило, чим менший тепловий датчик, тим менша його постійна часу. Постійна часу для термопар звичайно менше (550 мс), чим для Діода і транзистора (10 с) чи Іс (1 хв), використовуваних у ролі датчиків температури. Термопара з відкритим контактом, отриманим зварюванням встик проводу діаметром 25 мкм, має постійну часу 3 мс. Постійна часу збільшується при збільшенні діаметра проводу і захисної оболонки.

### **Приклад термопарного термометра з гальванічною розв'язкою**

Іноді виникає необхідність виміру температури усередині людського тіла. Для цього потрібний термометр із гальванічною розв'язкою, щоб виключити можливість поразення злектричним струмом. На мал. 7.19(а) представлена функціональна блок-схема ІС 2В 50 фірми Analog Device. ІС 2В 50 — це формуваль

сигналу термопар, реалізований на одному кристалі і забезпечуючий захист по входу (220 В, ефективне значення), гальванічну розв'язку ( $\pm 1500$  В), придушення синфазних сигналів (160 дБ), посилення з малим дрейфом ( $\pm 1$  мкВ/°С), фільтрацію й повну компенсацію холодного контакту.

Коефіцієнт підсилення визначається виразом  $G = 200 \text{ кОм}/R_G + 1$ ; тут  $R_G$  — резистор, що підключається користувачем до виходів 3 і 5. Внутрішні схеми забезпечують компенсацію опорного контакту. При безпосередньому приєднанні термопар (як показано на мал. 7.19(б)) працює внутрішній датчик температури опорного контакту; у застосуваннях з дистанційним зчитуванням сигналу термопар як зовнішній датчик температури опорного контакту можна використовувати транзистор 2N 2222. Ланцюги компенсації холодного контакту для термопар J-, K- і T-типів вбудовані в ІС 2В 50. Наприклад, при використанні термопар T-типу потрібно з'єднати перемичкою вхід низького рівня з відповідним виходом програмування ІС (як показано на мал. 7.19(б)). Для компенсації термопар інших типів між виходом програмування X й входом низького рівня включається резистор ( $R_x$ ). Для термопар E-типу  $R_x = 1,87$  кОм, для термопар R- і S-типів  $R_x = 19,6$  кОм, а для термопар V-типу резистор не потрібний.

Використовується ізольоване джерело живлення, що забезпечує зручність підстроювання вхідної напруги зсуву. Стандартний діапазон зміни вихідного сигналу ІС 2В 50 від - 5 до +5 В. Однак за допомогою

зовнішнього дільника напруги коефіцієнт посилення вихідного буферного підсилювача можна підвищити до 2, розширюючи діапазон зміни вихідного сигналу до  $\pm 10$  В.

Калібрування напруг зміщення здійснюється в наступному порядку:

1. Замкнути накоротко вхід «+» й вхід «-».

3. Установити за допомогою перемінного резистора підстроювання вхідної напруги зміщення (мал. 7.19(в)) нульова вихідна напруга при одночасній установці необхідного посилення. У більшості застосувань буде достатня корекція тільки вхідної напруги зміщення.

4. Підстроювання вихідної напруги зміщення (у діапазоні  $\pm 30$  мВ) можуть бути виконані в тому випадку, коли потрібно скорегувати цю напругу на неізолюваній стороні ІС.

## 5. РЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ

Електричний опір ряду матеріалів змінюється відтворюваним чином з температурою. Ці матеріали розділяються на два класи: метали й напівпровідники. З металів виготовляються резистивні термометри чи резистивні детектори (датчики) температури; вони були застосовані першими. Напівпровідникові матеріали стали застосовуватися пізніше; вони служать основою термісторів.

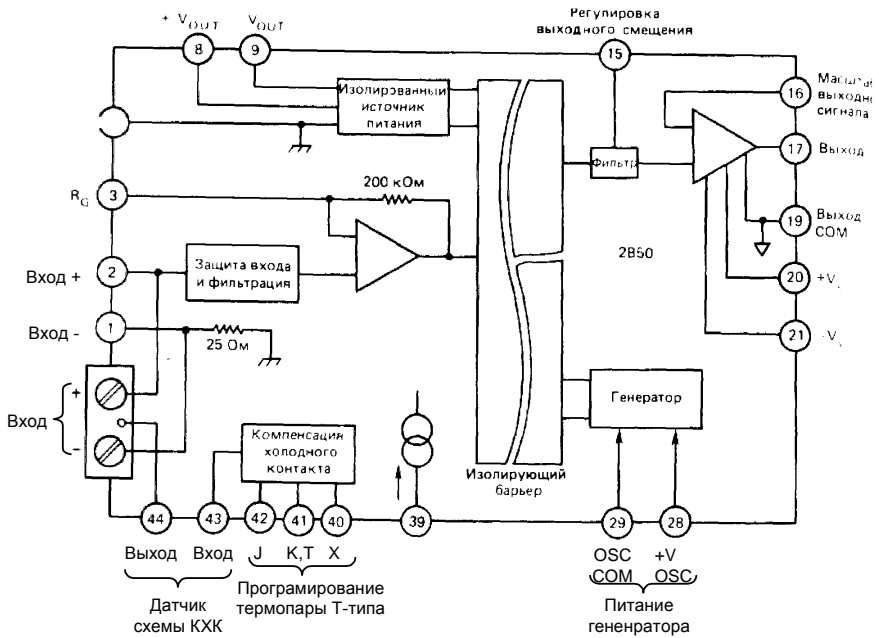
### 5.1 Резистивні термометри

Опір провідників (металів), як правило, зростає при збільшенні температури. Зміна опору з температурою описується наступним виразом [10]:

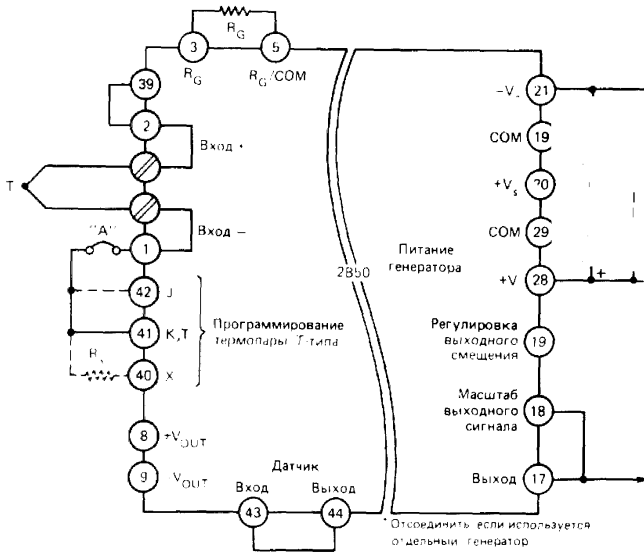
$$R_T = R_0(1 + a_1T + a_2T^2 + \dots a_nT^n)$$

де  $R_T$  — опір при температурі  $T^\circ\text{C}$ ;  $R_0$  — опір при  $0^\circ\text{C}$ ;  $a_i$  — константи. Число членів у розкладанні залежить від матеріалу, інтервалу температур й необхідної точності.

Найчастіше використовуються платина, нікель і мідь. Для представлення їхніх характеристик з високою точністю вимагаються дві (платина) чи три (нікель і мідь) константи  $a$ . Але в обмеженому діапазоні температур ( $0 \dots 100^\circ\text{C}$ ) хорошу точність забезпечує апроксимація  $R_T = R_0(1 + aT)$ . Спочатку в резистивних термометрах використовувався мідний дріт, але через низький питомий опір міді для намотування практично



(а)



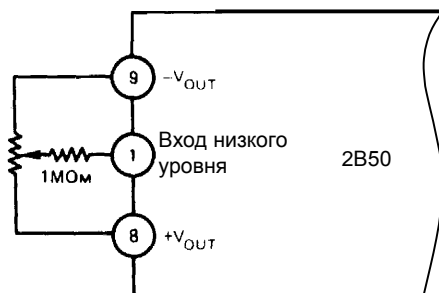


Рис. 5.1. IC 2B50 фірми Analog Device. (а) Функціональна блок-схема. (б) Типова схема використання IC 2B50. (б) Регулювання вхідної напруги зміщення [3]. Примітка. COM — загальна земля.

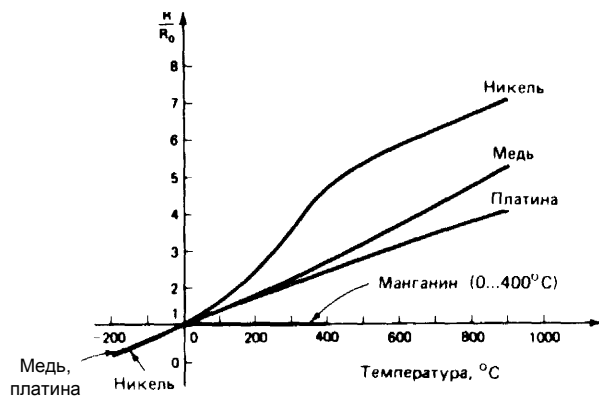


Рис. 5.2. залежності опору від температури для найбільш широко використовуваних резистивних датчиків температури [10].



*Примітка.* Манганін використовується для резисторів, опір яких відчутний до зміни температури працюючого елемента був потрібний провід дуже великої довжини. В даний час найбільше поширення одержали провідні датчики з платини. Як шляхетний метал, платина менш сприйнятливий до сторонніх домішок. При температурах нижче 20 К використовується родій, що характеризується більш високою чутливістю, чим платина. Поки ще використовуються елементи, що виготовляються з нікелю й його сплавів, оскільки вони мають низьку вартість і досить високе значення базового опору. Проте спостерігається стійка тенденція до їхньої заміни на платинові елементи. На мал. 7.20 наведені криві залежності опору від температури для широко використовуваних провідникових датчиків температури.

Платина використовується як у дровових, так й у плівкових елементах. Елементи з чистої платини формуються шляхом бездеформаційного намотування і потім випалюються. Вони застосовуються для інтерполяції Міжнародної практичної шкали температур 1968 (ІРТ-68) між фіксованими точками 13,81 К (потрійна точка водню) і 903,89 К (точка затвердіння сурми). Однак деякі конструкції вимірювальних перетворювачів із платиновими дрововими елементами використовувалися аж до температури 1050°C [15].

На рис. 5.3 показана одна з конструкцій калібруючо-еталонного платинового резистивного

термометра. Залежність  $R$  від  $T$  для дротового елемента з платини між  $-183$  й  $+630^\circ\text{C}$  задається формулою Каллендера — Ван Дьюзена:

$$R_T = R_0 + R_0\alpha[T - \delta(0,01T - 1)(0,01T) - \beta(0,01T - 1)(0,01T)^3],$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\delta$  — константи (причому  $\beta$  має різні значення для температур нижче й вище  $0^\circ\text{C}$ ). Значення  $\alpha$  визначається шляхом виміру опору елемента при  $100^\circ\text{C}$ , значення  $\beta$  — з вимірів опору при температурі нижче  $0^\circ\text{C}$ , звичайно при  $T = -182,96^\circ\text{C}$  (точка кипіння кисню). Константа  $\delta$  визначається шляхом виміру опору при температурі, що перевищує (на досить велику величину)  $100^\circ\text{C}$ , наприклад у точці кипіння сірки ( $+444,7^\circ\text{C}$ ). Типові значення констант:

$$\alpha = 0,00392^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\beta = 0 \text{ (якщо } T > 0) \text{ й } 0,11 \text{ (якщо } T < 0);$$

$$\delta = 1,49;$$

$$R_0 = 100 \text{ Ом.}$$

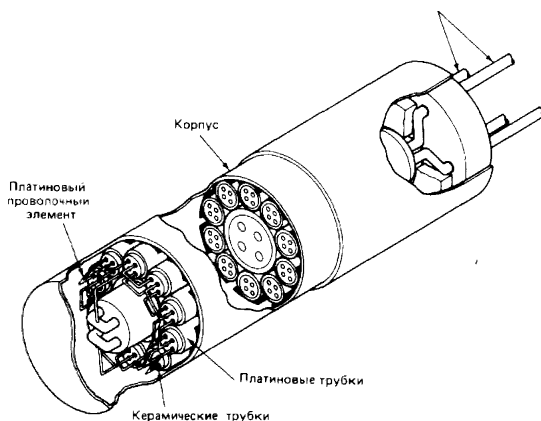


Рис. 5.3. Конструкція калібруючо-еталонного платинового резистивного термометра. (З дозволу фірми Rosemont, Іпс.) *Примітка.* Платинові трубки припаюються золотом до корпусу.

Температуру, обчислену по приведеному співвідношенню, можна скорегувати для шкали ІРТ-68, додаючи до неї мале температурне виправлення  $\Delta T$ . Ця поправка, як правило, не перевищує  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  і може бути розрахована по формулі

$$\Delta T = 0,045(0,01T - 1)(0,01T) \left( \frac{T}{419,58} - 1 \right) \left( \frac{T}{630,74} - 1 \right),$$

Величина константи  $\alpha$  залежить від чистоти платини, використовуваної в елементі, й зростає з підвищенням чистоти матеріалу. У США для довідкових таблиць залежності  $K(T)$  береться значення  $\alpha = 0,003925$ . Для промислових застосувань прийнятні значення  $\alpha = 0,00390$ . Опір елементів резистивних термометрів змінюється приблизно від 10 до більш ніж 25 000 Ом. Платина використовується в діапазоні

температур  $-267,78^{\circ}\text{C} \dots + 1010^{\circ}\text{C}$ , мідь — у діапазоні  $-1955,56 \dots +260^{\circ}\text{C}$  і нікель — при температурах  $-195,56^{\circ}\text{C} \dots +426,67^{\circ}\text{C}$ .

Резистивні термометричні мости можуть працювати як на змінному, так й на постійному струмі. Величина постійного чи ефективного значення перемінного струму звичайно вибирається в діапазоні 2...20 ма. Можлива поява деякої погрішності від самонагрівання термометра, але ця погрішність звичайно досить мала. Наприклад, платиновий елемент відкритої конструкції із опором 450 Ом, по якому протікає струм 25 ма, при зануренні у ванну з рідкого кисню має погрішність самонагрівання приблизно  $0,2^{\circ}\text{C}$  [10].

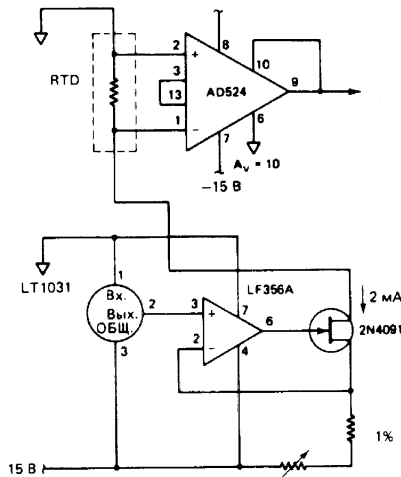


Рис. 5.4. Джерело струму 2 ма (у нижній половині малюнка) забезпечує спад напруги на платиновому датчику температури.

Підсилювач з коефіцієнтом підсилення 10 формує вихідний сигнал у діапазоні, що підходить для більшості плат збору даних [13].

*Примітка.* РТД-платиновий резистивний датчик, 100 Ом; LT1031 -- джерело опорної напруги + 10 В.

*Примітка.* Джерела живлення AD524 й LF356A повинні бути зашунтовані танталовим конденсатором ємністю 4,7 мкф.

На рис. 5.5 показані джерело струму й підсилювач для резистивного датчика температури. На практиці просліджується тенденція до пропускання підвищеного струму через датчик для одержання більш сильної залежності вихідної напруги від температури. Однак це викликає самонагрівання платинового елемента, що може привести до погрішностей у вимірі температури.

## 5.2 Термістори

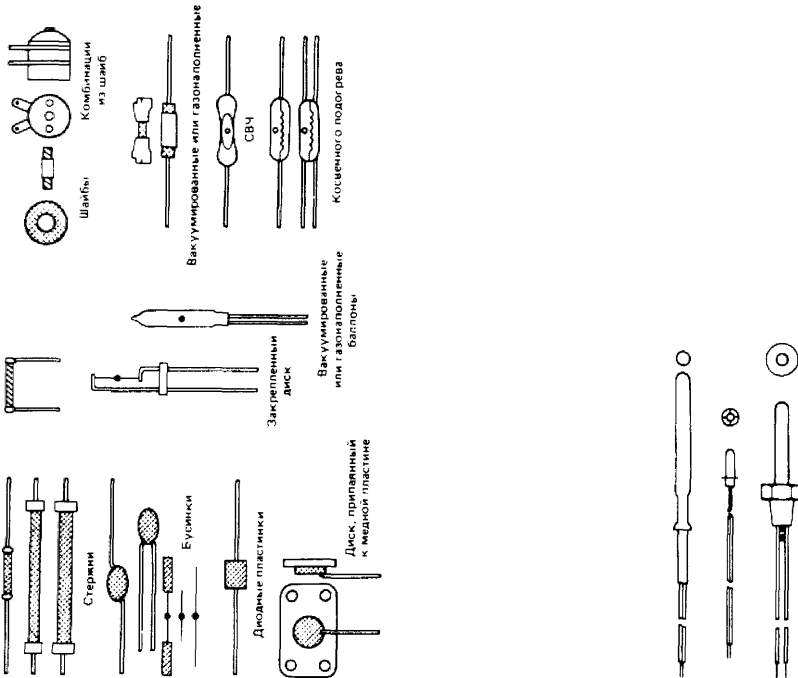
Термістори (чи терморезистори) — це термочутливі резистори, що виготовляються з напівпровідникових матеріалів (спечених сумішей сульфідів, селенідів, оксидів нікелю, марганцю, заліза, кобальту, міді, магнію, титана, урану й інших металів). Ці матеріали формуються в невеликі кульки (бусинки), диски, стрижні (звичайно герметизовані чи склом епоксидною смолою) і шайби. Деякі типи термісторів показані на рис. 5.5 [15]. Більшість термісторів характеризуються високим питомим опором й високим

негативним ТКО (температурним коефіцієнтом опору), тобто опір таких термісторів зменшується зі збільшенням температури. Величина від'ємного ТКО може складати кілька відсотків на градус Цельсія, що дозволяє використовувати термістори для детектування малих змін температури, що не вдається спостерігати за допомогою резистивних датчиків температури й термопарних схем. Плата за підвищену чутливість — втрата лінійності. Для термісторів залежності опору від температури в сильному ступені нелінійні.

Існують термістори і з позитивним ТКО, що виготовляються шляхом спікання суміші барію й титанату стронцію. Вони також реалізовані в різних конфігураціях. Ці термістори часто називають перемикальними термісторами через специфічну залежність опору від температури. При збільшенні температури їхній опір залишається практично постійним, поки не досягається температура переключення (точка Кюрі), поблизу котрої кожне додаткове збільшення температури викликає різке збільшення опору. Температура переключення може змінюватися від  $-20$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Термістори з позитивним ТКО часто використовуються як термостатуючі реле для контролю й регулювання температури всередині печі.

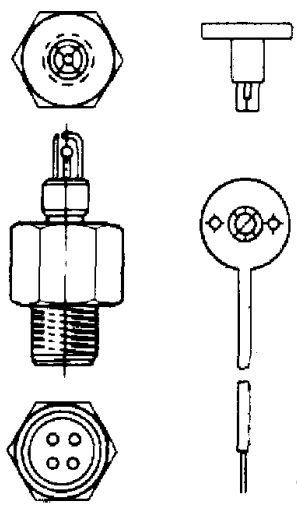
На рис. 5.6 порівнюються температурні залежності опору для термісторів з негативним й позитивним ТКО і для платиного резистивного термометра в інтервалі температур від  $+3$  до  $+170^{\circ}\text{C}$  [8]. Платиновий резистор має характеристику з позитивним ТКС

~0,34%/°C. Характеристика термістора з негативним ТКО спадає при зростанні температури; збільшення температури на 1°C приводить до зменшення опору приблизно на 4,5% при 30°C й приблизно на 1,6% при 155 °C. Опір термістора з позитивним ТКО при збільшенні температури змінюється слабо (ТКО -5 0,5%/°3), поки не досягається точка Кюрі, де нахил характеристики різко зростає до 67%/°3 (при температурі між 96 й 97°C) й потім зменшується, приймаючи при 135°C приблизно таке ж значення, як у термістора з негативним ТКО.



СБОРКИ ТЕРМИСТОРИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Температура газа



Температура поверхности

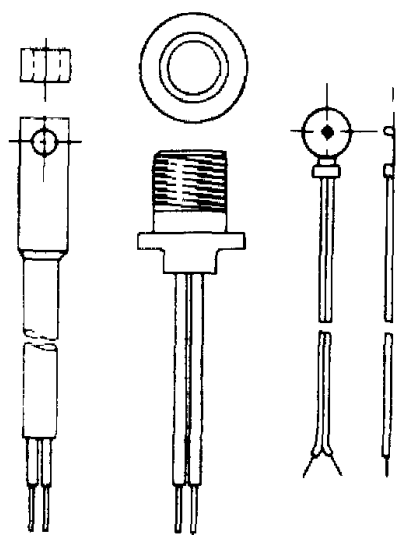


Рис. 5.5. Деякі типи термісторів.



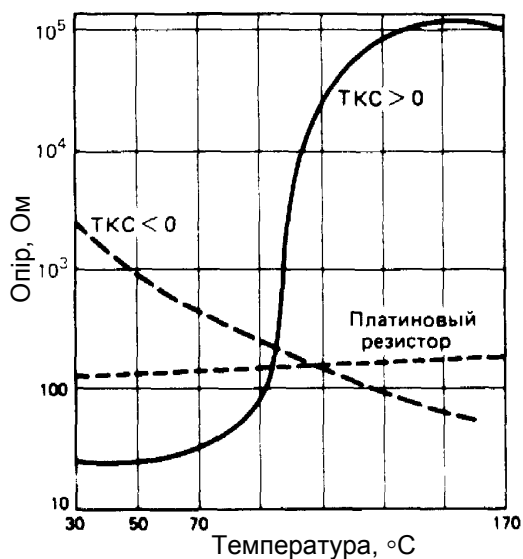


Рис. 5.6. Температурні залежності опору термісторів з від'ємним і позитивним ТКО і платинового резистивного термометра [8].

### 5.3 Емпіричні співвідношення

Основне емпіричне співвідношення, використовуване для описання залежності опору термістора від температури, має вид

$$R_T = R_0 \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right],$$

де  $R_T$  — опір термістора при вимірюваній температурі  $T(K)$  й  $R_0$  — його опір при деякій відомій температурі  $T_0$  (звичайно 298,15 K), причому зазначені

опори відповідають нульовій потужності розсіювання (відсутність самонагрівання). Величина  $R_0$  може змінюватися в інтервалі від декількох Ом до 10 МОм; високоомні термістори використовуються для виміру високих температур, низькоомні — для виміру низьких температур. Параметр  $\beta$ , що виражається в градусах Кельвіна, залежить від матеріалу термістора; його значення визначається по обмірюваних значеннях опору в точці танення льоду й при деякій температурі, трохи перевищуючій кімнатну, звичайно при 50°C (фірма Carborundum З. використовує температури 25 й 73,2°C). Цей параметр, відомий також як характеристична температура, слабо зростає при збільшенні температури. В інтервалі температур 1500...1600 К його типове значення відповідає приблизно 4000 К.

Фірма Oteea Engineering для описання властивостей термістора використовує формулу Штайнхарта — Харта [17]:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3 ,$$

де температура вимірюється в градусах Кельвіна. Параметри  $A$ ,  $B$  й  $C$  знаходяться шляхом рішення трьох рівнянь з відомими значеннями  $\hat{\ }^{\wedge}$  й  $\Gamma$ . Погрішність одержуваних по цій формулі інтерполірованих даних не перевищує +0,01°C при виконанні наступних умов для температур  $T_i$ :

$$\begin{aligned} -40^\circ\text{C} < T_1, T_2, T_3 < 150^\circ\text{C}; \\ |T_2 - T_1| < 50^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

$$|T_3 - T_2| < 50^\circ\text{C}.$$

Для більш вузького інтервалу температур адекватний опис температурної залежності опору термістора забезпечує формула

$$T = \frac{B}{\ln R - A} - C .$$

## 5.4 Термінологія

*Опір при нульовій потужності розсіювання* — опір термістора при деякій температурі, обмірюваної в умовах відсутності самонагрівання (робочий струм менш 100 мкА).

*Температурний коефіцієнт опору* чи ТКО — відношення швидкості зміни опору при зміні температури до значення опору при нульовій потужності розсіювання. Цей параметр — зручна характеристика чутливості термістора. По визначенню

$$\alpha(\% / ^\circ\text{C}) = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = -100 \frac{\beta}{T^2} ,$$

отже, при зменшенні температури а нелінійно зростає. Його типове значення  $-4,4\%/^\circ\text{C}$  при  $27^\circ\text{C}$ .

*Коефіцієнт дисипації* - потужність у міліватах, що викликає підвищення температури термістора на  $^\circ\text{C}$  стосовно температури навколишнього середовища.. У добре перемішуваній масляній ванні значення цього

параметра складає мінімум  $8 \text{ мВт}/^\circ\text{З}$ , у нерухомому повітрі — не менш  $1 \text{ мВт}/^\circ\text{С}$ .

*Постійна часу* визначається як час, необхідний для того, щоб вказувана термістором температура змінилася на  $63,2\%$  від різниці між його первісною температурою й новою вимірюваною температурою навколишнього середовища, у яке він поміщений; при цьому передбачається, що виводі термістора знаходяться в нерухомому повітрі.

*Стабільність* — здатність термістора зберігати свої характеристики ( $0,03^\circ\text{С}/\text{рік}$  протягом 12 років).

*Самонагрівання* обумовлене розсіюванням потужності ( $I^2 R$ ) у термісторі, що приводить до його нагрівання вище температури навколишнього середовища. Для деяких застосувань бажано забезпечити роботу термістора в режимі самонагрівання (наприклад, при вимірюваннях потоку). Для запобігання самонагрівання варто вибирати режим з дуже малим робочим струмом.

*Максимальна робоча температура* — максимальна температура термістора (обумовлена зовнішнім чи внутрішнім нагріванням), при якій він може працювати без істотної зміни стабільності своїх характеристик.

*Вольт-амперна характеристика* термістора показана на рис. 5.7. При дуже малих струмах виконується закон Ома, й струм через термістор пропорційний прикладеній напрузі (самонагрів відсутній). Однак при досить великих значеннях струму з'являється самонагрівання, що обумовлює

зменшення нахилу вольт-амперної характеристики через зменшення опору термістора. На лінійній ділянці кривої на рис. 1.25 температура термістора збігається з температурою навколишнього середовища. У максимумі кривої диференціальний опір термістора звертається в нуль, а при подальшому зростанні струму стає негативним. У цій області можливе теплове руйнування термістора. Розходження областей самонагрівання для характеристик термістора у воді й у повітрі зв'язано з різною теплопровідністю води й повітря. Використовуючи електричну аналогію для потужних транзисторів, ми можемо записати

$$T_j = P_d \Theta_{ja} + T_a,$$

де  $T_j$  - температура переходу, °С;  $P_d$  - потужність, що розсіюється транзистором, Вт;

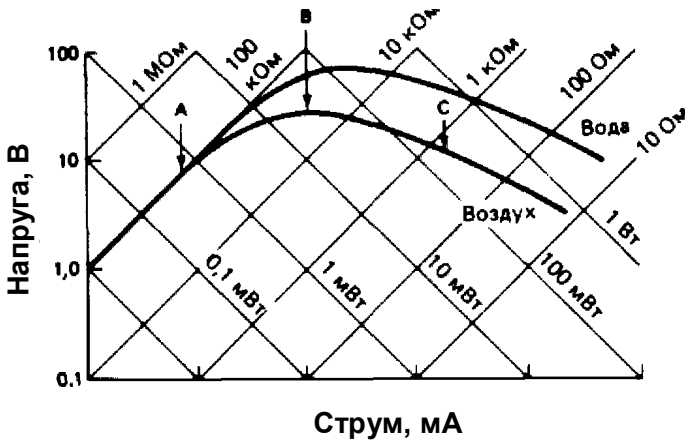


Рис. 5.7. Вольтамперні характеристики термістора в повітрі й у воді.

Точка А відповідає максимальному значенню струму, при якому ще можна знехтувати самонагріванням термістора. Точка В - точка максимального спадання напруги на термісторі. Точка С відповідає максимальному значенню струму, при якому ще не починається теплове руйнування термістора, якщо він знаходиться в повітрі.

$\Theta_{ja}$ - повний тепловий опір перехід - навколишнє середовище, °C/Вт;  $T_a$  - температура навколишнього середовища, °C. Тепловий опір перехід - повітря (без якого-небудь тепловідводу) у кілька разів більше, ніж аналогічний ефективний опір при використанні тепловідводу [5]. Тепловідвід (радіатор) забезпечує велику площу, з яким тепло, що розсіюється транзистором, може приділятися в повітря. Зовсім аналогічно термістори можуть працювати при більш високих струмах без відчутного самонагрівання, якщо тепловий опір між термістором і навколишнім середовищем малий, як у випадку роботи термістора у воді (мал. 7.25). У табл. 7.1 приведені конструкційні параметри і технічні характеристики різних термісторів [25].

## 5.5 Застосування

Діапазон типових застосувань термісторів дуже широкий. Термісторна пневмографія. Термістор поміщається в зовнішній носовий прохід для визначення різниці температур між вдихуваним холодним і видихуваним теплим повітрям (мал. 7.26). Ці дані у свою чергу використовуються для діагностики дихальної системи [23]. Робочий струм термістора вибирається невеликим, щоб самонагрів не перевищував  $1^{\circ}\text{C}$ . Адекватна чутливість може бути досягнута при потужності, що розсіюється, близько 5 мвт із граничним значенням 40 мвт для мініатюрних бусинок термісторів (велика потужність, що розсіюється, приводить до надмірного розігріву термістора і дискомфорту пацієнта під час процедури). Якщо пацієнт дихає через рот, термістор може бути розміщений у роті. Дана система працює незадовільно, коли температура видихуваного повітря (температура тіла) збігається з температурою навколишнього повітря.

Таблиця 5.1. Параметри термісторів [25]

Параметри	Бусинки в скляній оболонці	Бусинка в скляних зондах чи стрижнях	Бусинка в скляних балонах	Диски
Діаметр, см	0,013-0,222	0,049-0,254	0,23-1,27	0,13-2,54
Довжина чи товщина, см	0,222-0,344	0,317- 5,08	1,90-7,62	0,025-0,941
$R_T$ при 25°C, Ом	1-20 $\cdot 10^6$	1-20 $\cdot 10^6$	100-20 $\cdot 10^6$	4-1 $\cdot 10^6$
$\alpha_T$ при 25°C, %/°C	2,0-5,5	2,0-5,5	2,0-5,5	1,35-5,25
$\delta$ при 25°C, мВт/°C в	0,045-0,800	0,2-1,0	0,004-1,5	0,5-35,0
$\tau$ при 25°C, з, у нерухомому повітрі (тепловідвід для шайб)	0,1-3,0	2-25	-	5-400
$T_{max}$ , °C	150-200	150-300	150-300	10-125
$P_{max}$ , Вт	0,012-0,050	0,030-0,100	0,001-0,050	0,050-3,50
Нестабільність, %/рік	0,1-0,2	0,05-0,20	0,05-0,20	0,2-2,5

У цьому випадку впливає за рахунок самонагрівання підняти температуру термістора трохи вище температури тіла, по нижче рівня дискомфорту.

*Датчик швидкості з використанням ефекту теплопровідності.* Стабільні термістори. с малої постійної часу можна використовувати як вимірювальні перетворювачі швидкості. Принцип роботи таких перетворювачів заснований на конвекційному охолодженні нагрітого термістора,



підвішеного в рідині. Це застосування термісторів описується в розд. 10.2.

*Вимір потоку тепла при розчиненні.* У даному випадку використовується тепловий ефект при розчиненні холодної пігулки із солі. Застосовується для виміру серцевого викиду [26]. Процедура проводиться з застосуванням катетера Свана — Ганца. Катетер вводиться через вену в легеневу артерію. Сольовий індикатор, що вводиться в праве передсердя, змішується з кров'ю в правому шлуночку. Термістор, розташований поблизу наконечника катетера, фіксує рівень зниження температури крові в легеневій артерії. У розд. 10.1 описується, як використовувати цю інформацію для розрахунку потоку крові.

*Вимір температури.* На рис. 5.8 показана проста схема, що складається з електричної батареї, термістора і мікроамперметра. Шкала вимірювального приладу може бути проградуїрована в одиницях температури.

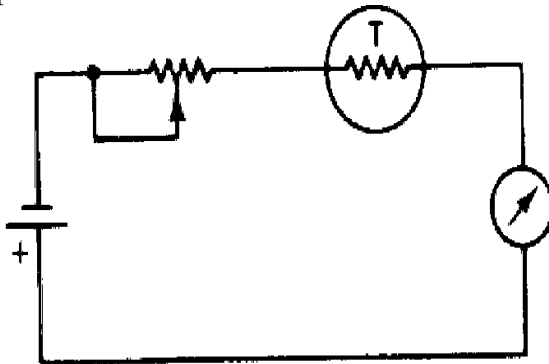


Рис. 5.8. Проста схема для виміру температури.

На рис. 5.9 представлена більш чутлива до зміни температури схема з термістором, включеним в одне з пліч моста.

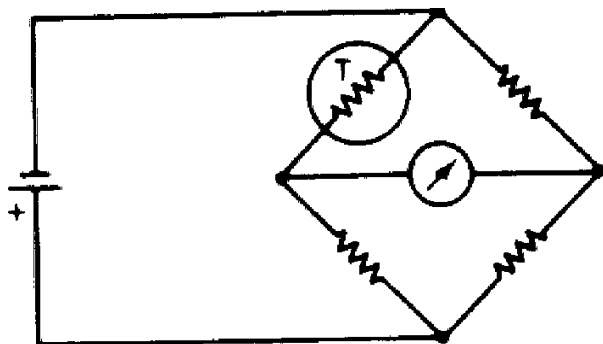


Рис. 5.9. Більш чутлива схема для виміру температури

Якщо в мостову схему ввести два термістори (мал. 5.10), то можна проводити різницеві виміри температури.

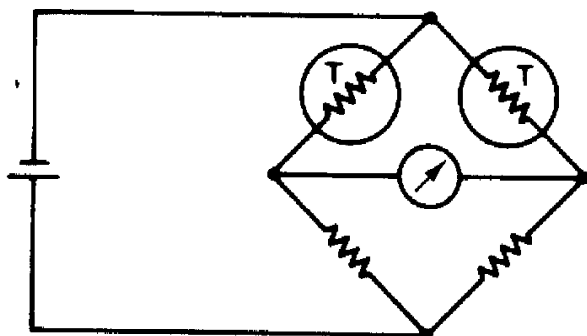


Рис. 5.10. Схема для виміру різниці температур.

За допомогою цієї схеми фіксуються температурні зміни величиною  $0,0005^{\circ}\text{C}$  [11].

*Температурна компенсація.* На мал. 7.30 представлена схема, яку можна використовувати для компенсації впливу температури навколишнього середовища на мідні обмотки у вимірювальних приладах, генераторах, двигунах і т.п. [11]. Мідь має позитивний, а термістор — негативний ТКС. Температурні зміни їхніх опорів компенсують один одного, у результаті підтримується відносна сталість опору обмотки<sup>^</sup> при зміні температури навколишнього середовища.

*Вимір рівня рідини.* У схемі, зображеної на рис. 5.11, опір термістора, коли він знаходиться в повітрі, зменшується через самонагрівання. При цьому в ланцюзі протікає струм, достатній для замикання контактів реле. При частковому зануренні термістора в рідину він проохолоджується за рахунок істотно більшої теплопровідності рідини (у порівнянні з повітрям), й, отже, його опір зростає. Тік у ланцюзі зменшується, і контакти реле розмикаються. Реле може працювати як клапан, що регулює витрату рідини.

*Виміру потужності.* Якщо бусинковий термістор з опором  $2\text{ кОМ}$  включити в одне плече резистивного моста з опором інших пліч, рівним  $200\text{ Ом}$ , і цей міст через перемінний резистор підключити до джерела

напруги (рис. 5.12), то, поступово збільшуючи струм у ланцюги і виділення тепла в термісторі, можна зменшити його опір до 200 Ом і збалансувати міст. По величині струму балансу можна розрахувати потужність постійного струму, що розсіюється в термісторі. Якщо подати на термістор (через відповідні конденсатори) додаткову високочастотну потужність, він буде нагріватися сильніше і міст розбалансується. Зменшуючи струм у ланцюзі і, отже, що розсіюється в термісторі потужність, можна знову збалансувати міст і розрахувати нове значення потужності постійного струму. Різниця між значеннями потужності постійного струму, отриманими в першому і в другому випадках, дорівнює високочастотної потужності.

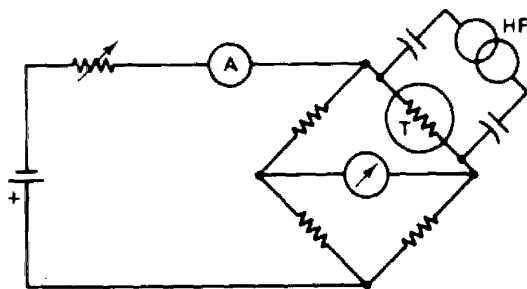


Рис. 5.11. Термісторна схема для виміру потужності постійного чи струму високочастотної потужності.

*Альтиметр.* Обговорювався дуже чутливий термісторний альтиметр (висотомір) [11], у якому термістор розташовується на поверхні рідини у

відкритому контейнері, а рідина нагрівається до крапки кипіння (рис. 5.12). Опір термістора залежить від температури кипіння рідини, а ця температура у свою чергу залежить від тиску, що діє на рідину. Тиск же є функцією висоти. Цей пристрій називають також гіпсометром; воно може вимірювати висоти в діапазоні від рівня моря до 37500 м з точністю не гірше 1%.

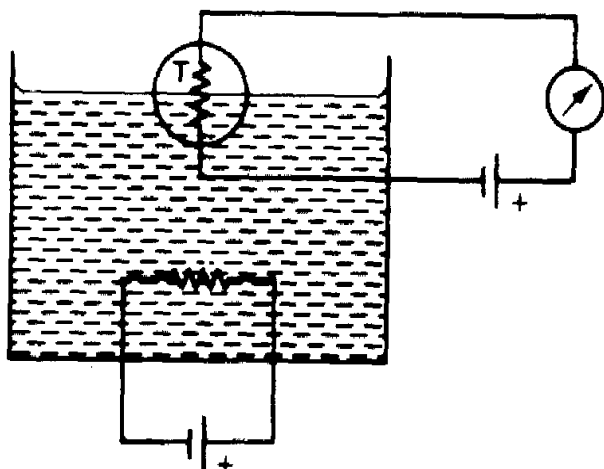


Рис. 5.12. Термісторний альтиметр

*Інші застосування.* Можливі і деякі інші застосування термісторів. Вони використовуються, наприклад, для стабілізації робочих режимів транзисторів (температурна компенсація), у пристроях затримки підключення навантажень, для контролю рівня потужності й у вимірювальних пристроях з використанням ефекту теплопровідності.

## 5.6 Лінеаризація

Нижче розглядається кілька способів лінеаризації  $R$   $T$ -характеристик термісторів.

Використання рівнобіжних резисторів. На рис. 5.13 показаний резистор  $R_p$ , що включається паралельно термістору для зменшення нелінійності останнього. Опір цього резистора розраховується з умови перегину лінеаризованої характеристики термістора в середній крапці повного інтервалу зміни температури:

$$R_p = R_{t,m} \frac{\beta - 2T_m}{\beta + 2T_m},$$

де  $R_{t,m}$  — опір термістора в середній крапці, що відповідає температурі  $T_m$ . За улучшение лінійності приходиться розплачуватися зменшенням чутливості.

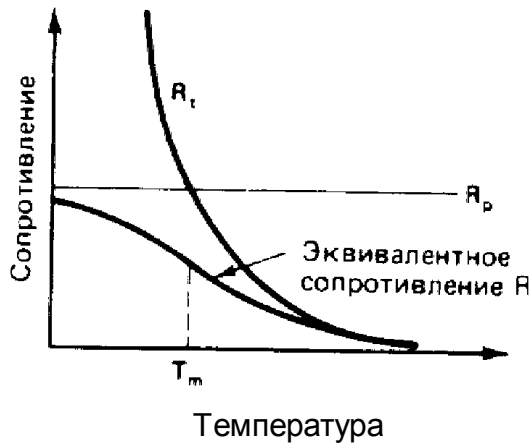


Рис. 5.13. Лінеаризація термістора за допомогою рівнобіжного резистора [6].

Температурний коефіцієнт опору зменшується і стає рівним

$$\alpha_p = \frac{(\beta / 2T_m)}{(R_{t,m} / R_p) + 1}$$

Використання послідовательних резисторів. На рис. 5.14 показаний резистор R включається послідовно з термістором для лінеаризації його характеристики провідність — температура. Провідність цього резистора можна розрахувати по наступній формулі:

$$G_s = \frac{1}{R_s} = \frac{\beta - 2T_m}{\beta + 2T_m} G_{t,m}$$

де  $G_{t,m}$  — провідність термістора при температурі  $T_m$  (у середній крапці робочого діапазону температур). Як і в попередньому випадку,  $\alpha_s$  зменшується і стає рівним

$$\alpha_p = \frac{(\beta / 2T_m)}{(G_{t,m} / G_s) + 1}$$

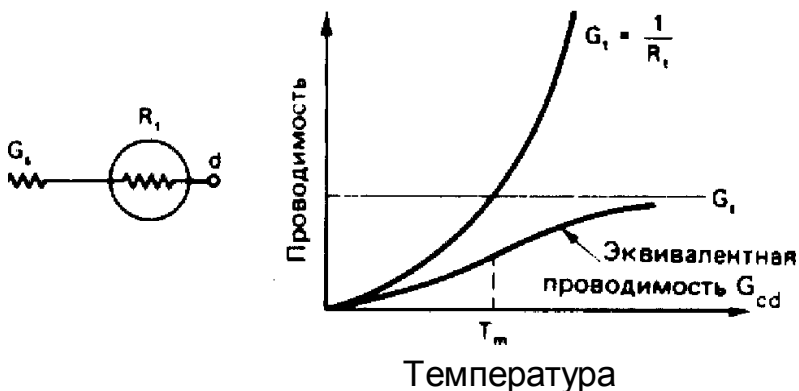


Рис. 5.14. Лінеаризація термістора за допомогою послідовного резистора [б].

*Лінеаризація термістора за допомогою ОП.* На рис. 5.15 показана практична схема для послідовної (рис. 5.16) лінеаризації термістора з використанням ОП. Характеристика залежності провідності термістора від температури лінеаризована з допомогою послідовного резистора  $R_s = [б]$ . На послідовний ланцюг, утворений резистором  $R_s$  і термістором, подається напруга всього 50 мВ для виключення ефектів самонагрівання. Вхідний опір ОУ дуже великий, так що струм, що протікає через резистор зворотного зв'язку  $R_f$ , дорівнює току через термістор за винятком малого струму зсуву  $i_0$ . Вихідна напруга ОУ лінійно зв'язана зі струмом термістора й у силу послідовної лінеаризації є лінійною функцією температури. Для даної схеми максимальна нелінійність не перевищує  $0,15\text{ }^\circ\text{C}$  в інтервалі температур  $0...40\text{ }^\circ\text{C}$ .



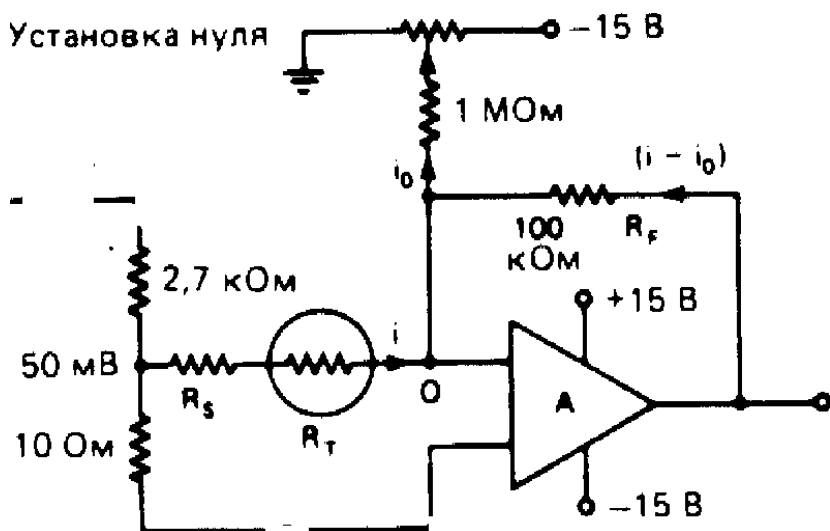


Рис. 5.15. Лінеаризація термістора з використанням ОП [6].

Перетворення температури в частоту. На мал. 5.16 показана принципова схема простого генератора мультівібраторного типу, у ланцюг зворотного зв'язку якого включений термістор. Частота коливань прямокутної форми, які виробляються цим генератором, нелінійно змінюється при зміні температури. Дану схему можна зв'язати з мікроЕОМ. МікроЕОМ підраховує частоту проходження імпульсів на виході генератора і визначає по цій частоті температуру. Залежність частоти від температури для цієї схеми визначається наступною формулою:

$$f = \frac{\ln[(1 + \gamma)] \exp(\beta / T_0) \exp(-\beta / T)}{2CR_0}$$

де  $R_0$  і  $Z$  задають поминальну частоту, яку можна змінювати в невеликих межах, варіюючи значення параметра  $\gamma = R_2/(R_1+R_2)$ . Як і колись, ( $\gamma$  — параметр матеріалу термістора, значення якого повинно бути чи відомо знайдене шляхом калібрування.

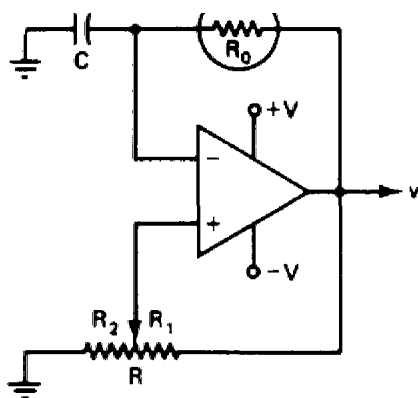


Рис. 5.16. Простий дешевий перетворювач температури в частоту

У даному випадку може бути використана лінеаризація за допомогою заносимо в пам'ять ЕОМ довідкової таблиці, що зберігає значення температури в послідовному наборі комірок пам'яті. Адреси цих комірок відповідають числу підрахованих за визначений проміжок часу коливань на виході схеми. Такий спосіб особливо зручний для виміру температури у вузькому діапазоні. Його перевага полягає в тім, що не потрібний АЦП і для введення інформації досить мати усього лише однорозрядний вхід. Крім того, за допомогою пристроїв, що розв'язують, (оптичного чи трансформаторного типу)

легко забезпечити передачу цієї інформації з високим рівнем перешкодозахищеності. Однак при необхідності проведення вимірів у широкому діапазоні температур первісне калібрування стає надзвичайно громіздкої, причому кожен новий датчик необхідно відкалібрувати заново. Можуть також виникнути проблеми і з нейтралізацією дрейфу ємності конденсатора З під час проведення вимірів.

На рис. 5.17 представлена більш складна схема перетворення температури в частоту. Вихідний сигнал мостової схеми, у якій використовується лінеаризований термістор YSI 44018, підсилюється інструментальним підсилювачем і перетвориться в частоту за допомогою перетворювача напруга — частота з повним діапазоном 100 кГц. Схема характеризується високою швидкістю і дозволом; у її робочому інтервалі температур 0 ... 100°C забезпечується точність не гірше 0,15°C. Можливий також аналоговий вивід значень температури (10°C/V).

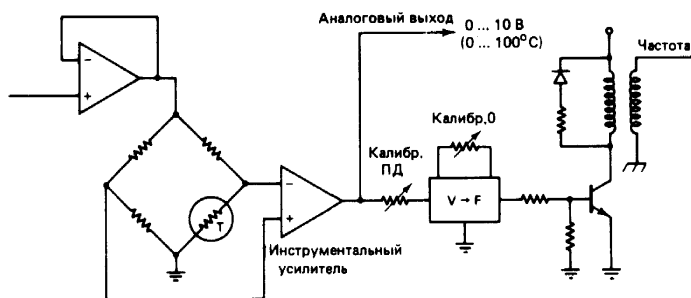


Рис. 5.17. Перетворювач температури в частоту з використанням лінеаризованого термістора в мостовій схемі [22].

Імпульсний трансформатор забезпечує роботу без заземлення.

### 5.7 Інтерфейс з IBM PC

На рис. 5.18 показана проста схема для забезпечення інтерфейсу термістора серії 400, що випускається фірмою Yellow Springs Instrument Co. (щуп для виміру температури поверхні типу “банджо”), з IBM PC. Постійна часу цього термістора — 800 мс при максимальній робочій температурі 1500С. Інтегральний стабілізатор напруги типу 7805 підключений до лінії + 12 В блоку живлення IBM PC і виробляє дуже стабільне живлення + 5 В. У схемі використовуються два ОП на польових транзисторах (RCA CA3140). Ці ОУ мають дуже високий вхідний опір (1,5 Тім), дуже малий вхідний струм (10 па) і низька вхідна напруга зсуву (2 мВ).

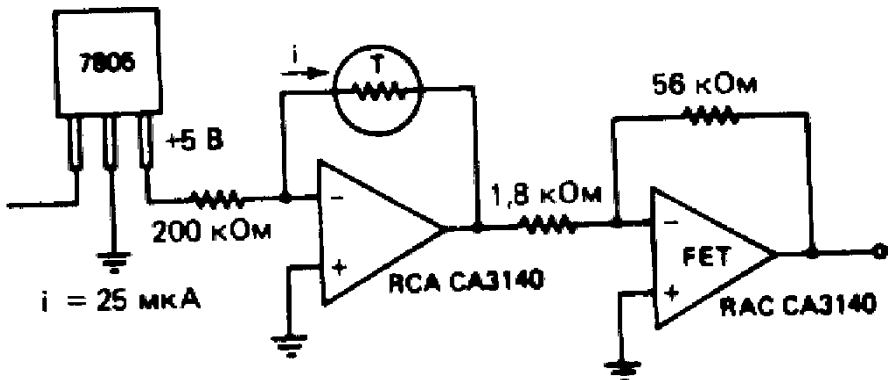


Рис. 5.18. Проста схема, що забезпечує інтерфейс термістора YSI серії 400 з IBM PC.

Джерело  $\pm 12\text{В}$  блоку живлення IBM PC використовується для харчування цих ОУ. Завдяки дуже високому вхідному опору і дуже малому вхідному струму ОУ першого каскаду стабілізатор напруги  $+ 5\text{ В}$  і послідовно включений з ним резистор ( $200\text{ кому}$ ) утворюють джерело постійного струму ( $25\text{ мка}$ ). Цей постійний струм протікає через термістор. Оскільки його величина значно менше  $100\text{ мка}$ , він не викликає самонагрівання термістора. Термістор діє як перемінний резистор, що змінює свій опір з температурою. Другий каскад схеми — підсилювач, що інвертує. Вихідна напруга цього підсилювача змінюється приблизно від  $0,15$  до  $5,6\text{ В}$  при зміні температури від  $100$  до  $0^\circ\text{C}$  відповідно.

На рис. 5.19 представлено програмне забезпечення до розглянутого прикладу. Це інтерактивна Бейсік-програма, що забезпечує на вибір користувача калібрування термістора при двох чи трьох температурах. Якщо обрано двохточкове калібрування, програма видає запит на проведення калібрування термістора при  $0$  і  $100^\circ\text{C}$ . Вибір таких температур обумовлений простотою їхнього одержання. У програмі використовується базове емпіричне співвідношення для термісторів (формула (7.7)), по якому розраховується температура. При виборі трьохточкового калібрування програма видає запит на проведення калібрівочної процедури при деякій відомій температурі між  $0$  і  $100^\circ\text{C}$  в доповнення до калібрувань у крижаній ванні і киплячій воді. Користувач повинний ввести з терміналу значення цієї

відомої температури. При трьохточковому калібруванні в програмі для розрахунку температури використовується формула Штайнхарта—Харта (7.8). Якщо обчислена температура нижче 0°C чи вище 100°C, програма повідомляє користувачу, що температура вийшла за межі діапазону калібрування.

Вихід розглянутої інтерфейсної схеми з'єднується з каналом 0 в АЦП на платі збору дані фірми Testar Lab Master. Програма перевіряє стабільність вихідної напруги схеми в кожній каліброваній крапці. Програма вважає, що вихідна напруга стабільна, якщо воно змінюється не більше ніж на 10 мВ при відстеженні протягом 5 с. Оскільки діапазон зміни вихідної напруги не перевищує 5 В, використовуються тільки 25% можливих кодових комбінацій АЦП (повний діапазон даного АЦП складає  $\pm 10$  В при 4096 кодових комбінаціях). Таким чином, фактично ми маємо 10-розрядний дозвіл замість повного 12-розрядного дозволу. Це означає, що дозвіл по температурі при використанні цього АЦП складає  $\pm 0,05$  °C ( $\pm 1/2$  МЗР при 10-розрядному дозволі і повному діапазоні 100°C). Однак звертаємо ваша увага, що результуюча точність виміру температури відрізняється від зазначеної величини, оскільки є погрішності в стабільності і точності температур калібрування, існує дрейф характеристик схеми, виявляються погрішності інтерполяції і т.п.

## 6. ІНШІ СПОСОБИ ВИМІРУ ТЕМПЕРАТУРИ

### 6.1 Ультразвуковий тонкоплівковий термометр

Вимір температури ультразвуковим методом засновано на температурній залежності швидкості звуку. Ультразвуковий тонкоплівковий термометр можна використовувати для поточного контролю температур у ядерних реакторах у діапазоні 2 000 .. 3 000 К с максимальною погрішністю 30°C.

### 6.2 Кварцовий термометр

Частота коливань кварцового генератора, побудованого на кристалі кварцу, лінійно залежить від температури. Кварцовий термометр має точність  $\pm 0,04^\circ\text{C}$  і може використовуватися в діапазоні температур від  $-80$  до  $+250^\circ\text{C}$  [6].

### 6.3 Джонсоновський шумовий термометр

Спектральна щільність потужності шумів ( $S_v$ ), що діють на ненавантаженому резисторі з опором  $R$ , визначається вираженням

$$S_v = \frac{4hfR}{\exp(hf / kT) - 1}$$

де  $h$  — постійна Планка;  $k$  — постійна Больцмана;  $f$  — частота, Гц;  $T$  — абсолютна температура, градуси Кельвіна. Джонсоновський шумовий термометр використовується для виміру температури в ядерних реакторах у діапазоні від 400 до 1770 К с точністю  $\pm 20^\circ\text{C}$  [4].

#### 6.4 Термометр, побудований на використанні ядерного квадрупольного резонансу

Частота ядерного квадрупольного резонансу для ядер хлору  $^{35}\text{Cl}$  у хлораті калію  $\text{KClO}_3$  зменшується при збільшенні температури. Термометр, що працює на цьому ефекті, застосовується в діапазоні температур від 90 до 398 К і забезпечує точність  $\pm 1\text{мк}$ . Він використовується як еталонний термометр, що не вимагає повторного калібрування за допомогою якого-небудь первинного еталона по закінченні деякого проміжку часу.

#### 6.5 Індукційний термометр

Індукційний термометр, що працює на принципі детектування вихрових (індукційних) струмів, реалізує безконтактний спосіб виміру температури. Вихрові струми виникають, коли силові лінії високочастотного магнітного поля перетинають поверхню сталеві пластини і викликають появу електрорушійної сили в сталі. Ці вихрові струми створюють нове магнітне поле, що у свою чергу викликає зміну імпедансу детектуючої котушки. Величина вихрового струму змінюється зі зміною температури сталеві пластини, а величина сигналу, що наводиться їм, залежить ще і від відстані між детектуючою котушкою і поверхнею сталеві пластини. Індукційний термометр застосовується в металургії для виміру температури сталеві листа, що рухається, у діапазоні від 25 до  $300\text{ }^\circ\text{C}$  з погрішністю, що не перевищує  $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$  [21].



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Контролери малоканалльні мікропроцесорні Реміконті Р-130. Технічний опис ГІДЖ 2.339.000 ТО; Івано-Франківськ, Спеціальне конструкторське бюро засобів автоматизації.2000.

2. Пістун Є.П., Лесовий Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. – Львів: видавництво ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. - 576 с.

3. Обозовський С.С. Інформаційно-вимірювальна техніка: Методологічні питання теорії вимірювань.- К.:ІСДО, 1993. – 424 с.

4. Семенцов Г.Н., Когуч Я.Р. Горбійчук М.І., Дранчук М.М. Новітні засоби контролю і автоматизації технологічних процесів в бурінні: Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 190 с.

5. Семенцов Г.Н., Когуч Я.Р., Когутяк М.І., Горбійчук М.І., Дранчук М.М., Вошинський В.С., Шавранський М.В. Основи автоматизації виробничих процесів в бурінні. Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 270 с.

6. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование / Цапенко М.П. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 439 с.