

# ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

---

к.ф.-м.н., ст. викл.

Пилипенко О.В.

- Температура – це величина, що використовується для визначення ступеня нагрівання тіла або середовища.
- Перший термометр, побудований на принципі термічного розширення повітря, був запропонований Галілеєм у 1592 році.
- Вирішальним кроком в галуззі виміру температури можна вважати пропозицію шведського астронома Цельсія розділити інтервал між крапками танення льоду і кипіння води на 100 градусів.



- Англійський учений Кельвін запропонував будувати температурну шкалу, виходячи з кінетичної енергії молекул.
- При  $0^{\circ}\text{C}$  середня кінетична енергія молекул газу має деяку визначену величину. Зі зниженням температури на кожний градус Цельсія молекули втрачають  $1/273$  частину своєї кінетичної енергії, і убування енергії молекул відбувається зовсім рівномірно. Це означає, що при температурі  $-273^{\circ}\text{C}$  чи, точніше, при  $-273,16^{\circ}\text{C}$  молекули мають нульову кінетичну енергію.
- співвідношення між двома шкалами виражаться формулою:

$$K = ^{\circ}\text{C} + 273,16.$$

## Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ) за редакцією 1968 р.

- МПТШ-68 установлюється для температур від 13,82 до 6300 К, яка може бути забезпечена сучасними засобами вимірів.
- Як еталони засобів виміру для різних галузей температур використовуються:
- від 13,81 до 903,89 К - платиновий термометр опору;
- від 903,89 до 1337,58 К - платинородій - платинова термопара;
- від 1337,58 до 6300 К - квазімонохроматичний пірометр.

# Засоби виміру температури

- Засіб виміру температури, призначений для виробітку сигналу у вигляді, зручному для сприйняття спостерігачем, автоматичної обробки, передачі й використання в автоматичних системах керування, називається **термометром**.

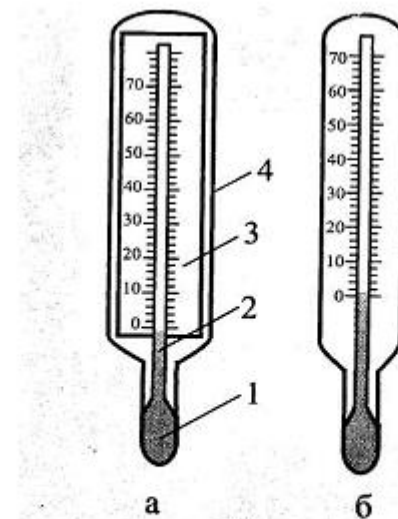


*Таблиця 1.1 - Температурні границі використання промислових засобів виміру температури*

Типи засобів виміру	Розмаїття засобів виміру	Границя використання, °C	
		нижня	верхня
Термометри розширення	Рідинні скляні термометри	-200	+750
	Манометричні термометри	-200 (-272)	1000
Термометри опору	Термометри опору металеві	-260	1100
	Термометри опору напівпровідникові	-272	600
Термоелектричні термометри	Термопара	-200 (-270)	2200 2800
Пірометри	Оптичні пірометри	700	600 (100000)
	Пірометри спектрального відношення	300	2800
	Пірометри повного випромінювання (радіаційні пірометри)	-50	3500

# Рідинні термометри

- Для виміру температури в лабораторних умовах і промисловій практиці широко використовуються скляні рідинні термометри, які є самим старим видом термометрів.
- Вони характеризуються досить високою точністю, невеликою вартістю й простотою у використанні. Принцип дії термометра заснований на залежності між температурою й обсягом термометричної рідини, вкладеної в скляну оболонку.



*а) кийовий; б) технічний із вкладеною шкалою  
1 – термобалон; 2 – капіляр; 3 – шкала; 4 – оболонка*

# Технічні термометри електроконтактні

- використовуються для замикання й розмикання ланцюга електричного струму з метою сигналізації, регулювання (у найпростіших схемах) температури в лабораторних і промислових умовах.
- Принцип його заснований на здатності ртуті служити провідником електричного струму.

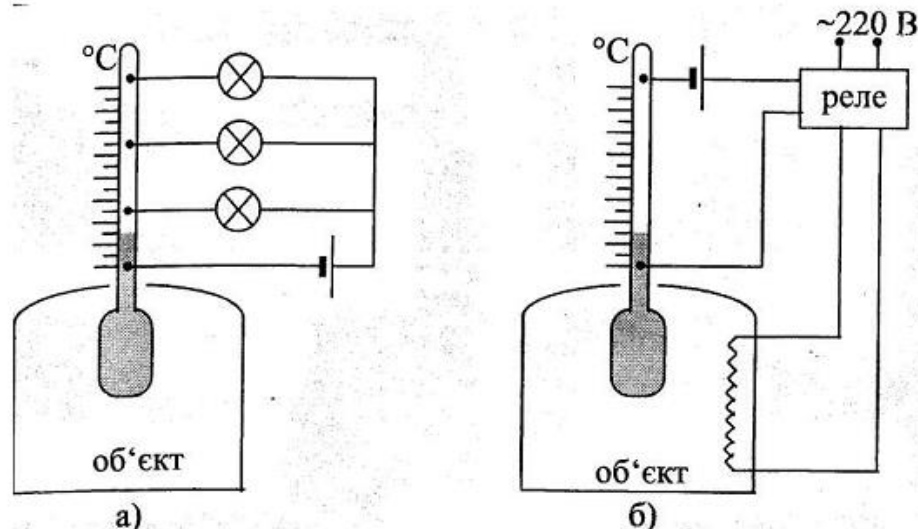
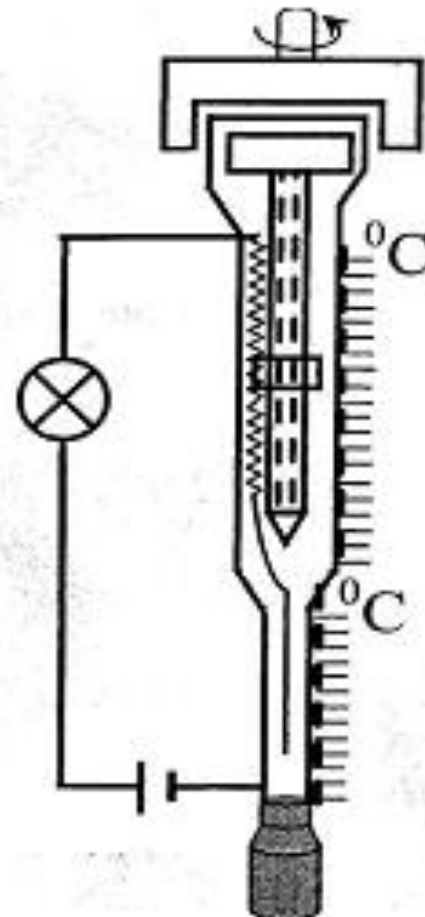


Рисунок 1.2 – Електроконтактні термометри  
а) у схемах сигналізації; б) у схемах регулювання



- Термометри з контактом, що рухається, забезпечують замикання й розмикання електричного ланцюгу при кожному значенні обраної шкали термометра. Ртуть, що переміщається в капілярі, забезпечує електричний контакт упаяними електродами, навантаження на який не повинна перевищувати 0,5 мА при напрузі не більше 0,3В.



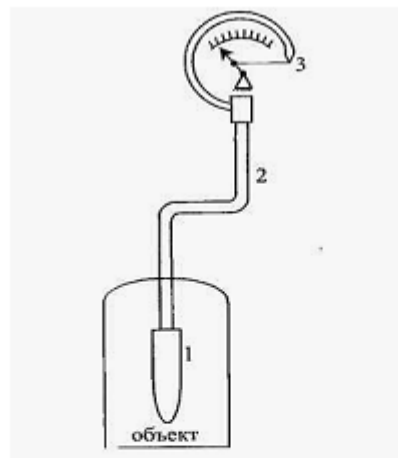
*Рисунок 1.3 – Схема електроконтактного термометра із рухомим контактом*

- Спеціальні ртутні термометри (максимальні) використовуються для фіксування максимальної температури атмосферного повітря або води у водоймах (метеорологічні термометри) або для визначення максимальної температури людського організму (медичні). У цих термометрах використовується незмочуванність скла ртуттю й у місці пережиму капіляра відбувається розрив стовпа ртуті при охолодженні термобалона.



# Манометричні термометри

- Принцип дії заснований на тому, що використовується розширення рідини або газу й приміщення балонів у середовище, для якого вимірюється температура. При підвищенні температури підвищується тиск усередині балона. Цей тиск передається по капіляру у вимірювальну пружину. Під дією тиску пружина розправляється й повертає стрілку



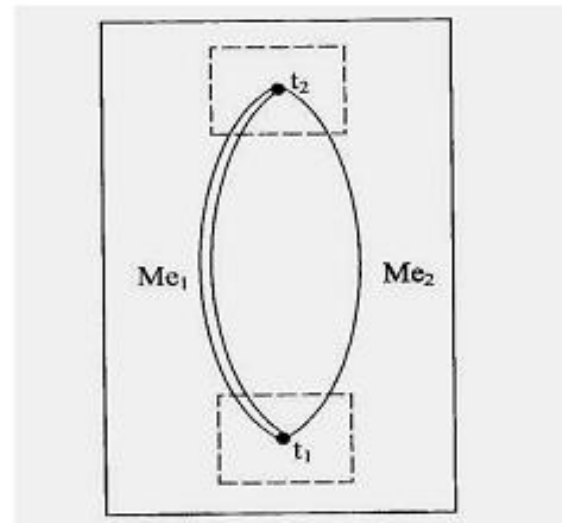
1-балон; 2 –вимірювальна трубка; 3 – манометр

*Рисунок 1.5 – Манометричний термометр*

- Газовий манометричний термометр призначений для виміру температури від  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Як газ, звичайно, використовують азот.
- Рідинні термометри в основному призначені для виміру температури від  $-150$  до  $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Як термометричні рідини застосовують ртуть і спирт.
- Конденсаційні манометричні термометри застосовуються для виміру температури від  $-50$  до  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У конденсаційних приладах балон заповнюється рідиною на три чверті, інша частина обсягу заповнена насиченими парами. Як термометрична рідина в конденсаційних термометрах застосовують фреон 22, пропілен, хлористий метил, ацетон.
- Газові й рідинні манометричні термометри випускають із класом точності 1; 1,5 й 2,5. Конденсаційні прилади випускаються із класом точності 1,5; 2,5 й 4

# Термоелектричні термометри

- Вимір температури за допомогою термоелектричних термометрів засновано на фізичному явищі термо-ЕРС, що було відкрито німецьким фізиком Томасом Зеєбеком у 1821 році.
- При контакті двох металів, що мають різну концентрацію вільних електронів, відбудеться явище дифузії, тобто електрони почнуть переходити з одного металу в інший, створюючи контактну різницю потенціалів. Величина виниклого потенціалу буде залежати як від природи самих металів (тобто розходження в них вільних електронів), так і від температури в місці контакту.



*Рисунок 1.6 –  
Термоелектричний  
ланцюг*

- Для виникнення електричного струму в ланцюзі, що складається з двох металів, необхідні дві умови:
- електричний ланцюг повинний складатися з двох різнорідних провідників;
- температура в місцях з'єднання провідників повинна бути різною, тобто  $t_1 \neq t_2$ .
- З'єднання двох провідників з різних металів при різній температурі виконане з метою виміру температури газоподібних, рідких і твердих середовищ (чи одержання електричної енергії) одержало назву «термопара» (чи термоелектричний генератор)

$$\Delta E = E_{t_1} - E_{t_2},$$

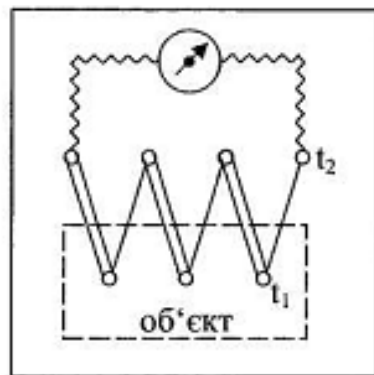
де  $\Delta E$  - результуюча ЕРС, що розвивається термопарою;

$E_{t_1}$  - ЕРС, що виникає в місці з'єднання при температурі  $t_1$ ;

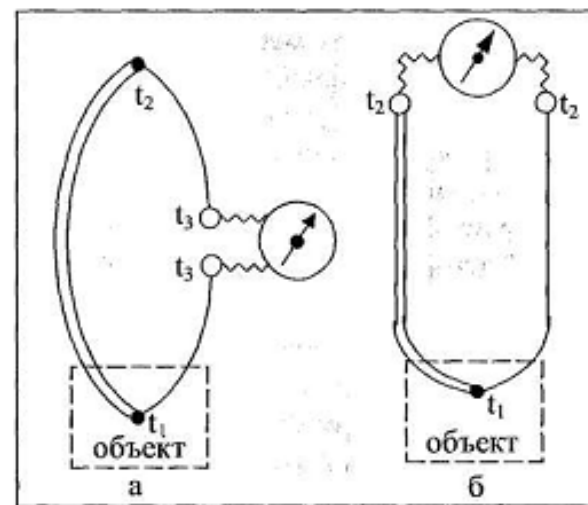
$E_{t_2}$  - ЕРС, що виникає в місці з'єднання при температурі  $t_2$  ( $t_1 > t_2$ ).

- Для виміру термо-ЕРС, що розвивається термопарою, використовують два способи підключення вимірювального приладу: у розрив електрода (рисунок 1.7, а) і в розрив спаю, тобто в розрив місця з'єднання (рисунок 1.7, б).

У першому випадку в термопарі буде чотири кінці: робочий з температурою  $t_1$ , вільний з температурою  $t_2$  і нейтральні з температурою  $t_3$  причому, температури цих двох нейтральних кінців повинні бути постійними при будь-якому їх зне-



**Рисунок 1.8 -  
Термобатарея**



*а – розрив електрода; б – у розрив місця з'єднання*

**Рисунок 1.7 – Включення вимірювального приладу у ланцюг термопарі**

- До матеріалів, використовуваних для виготовлення термопар, пред'являються такі вимоги:
- лінійна характеристика, тобто лінійна залежність між вимірювальною температурою і вироблюваною термо-ЕРС;
- стабільність характеристики протягом тривалого часу роботи;
- висока жаростійкість (окалиностійкість), тобто здатність працювати в умовах підвищених температур без окислювання термопарних проводів;
- висока жароміцність (збереження механічних властивостей при високій температурі);
- хімічна стійкість при роботі в агресивних середовищах, як рідких, так і газоподібних;
- однозначність характеристики в широкому діапазоні температур;
- однорідність термоелектричних властивостей по довжині провідника;
- легкість технологічної обробки матеріалу для одержання термопарного проводу;
- гарні економічні показники.



# Платинородій-платинова термопара

застосовується для тривалого виміру температур в області від 0 до 1300 °С та короткочасно – до 1600 °С. Градувальне позначення цих термопар - ПП. Платинородій-платинові термопари (ПП) відносяться до числа кращих термоелектричних термометрів по точності і відтворюваності термо-ЕРС, тому вони застосовуються в основному в якості еталонних і зразкових термометрів. У цій функції вони розділяються на наступні три різновиди: еталонні (ТПП - Е), зразкові (ТПП - О), робочі підвищеної точності (ТПП - РПТ) і технічні (ТПП)

# Платинородій-платинородієві термопари

одержали велике поширення в промисловості й у лабораторній практиці для тривалого виміру високих температур від 300 до 1600 °С та короткочасно – до 1800 °С. Позитивний електрод - сплав з 30 % родію і 70 % платини, а негативний - з 6 % родію і 94 % платини. Градувальне позначення цих термопар - ПР 30/6 (цифри вказують зміст родію в одному і другому термоелектродному проводі)

Хромель-копелеві термопари широко застосовуються для виміру температур різних середовищ у межах від - 50 до 600°C. Градувальне позначення цих термопар ХК.

Термопари типу ХК можуть експлуатуватися як в окисній так і у відбудовній атмосфері у зазначеному діапазоні виміру температур і застосовуються для виміру температури продуктів згоряння в димовідвідних трактах печей, для контролю температури різних деталей, що працюють в умовах підвищених температур і в інших областях.

- Хромель-алюмелеві термопари застосовуються для виміру температур від -200 до 1100 °С. Термопари типу ХА застосовуються для виміру температури в робочому просторі теплових агрегатів (печей, котлів і ін.), температури газових середовищ, пара і рідини.
- Вольфрам-ренієві термопари застосовуються порівняно рідко і призначені для тривалого виміру температур від 0 до 2200 °С, короткочасно - до 2500 °С. Вони можуть бути використані для виміру температури у вакуумі, у нейтральному чи відбудовному середовищі.

# ВИМОГИ, ЯКИМ ПОВИННІ ЗАДОВОЛЬНЯТИ РІЗНІ КОНСТРУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ САМОЇ

## ТЕРМОПАРИ:

- спай термопар (робочий кінець) повинний забезпечувати гарний контакт між двома термоелектродами термопар;
- термоелектроди по всій довжині повинні бути добре ізольовані друг від друга з використанням керамічної ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ) чи іншої ізоляції, що була б інертна до термоелектродних проводів при високій температурі;
- термопара разом з ізоляцією повинна бути поміщена в захисну газонепроникнену гільзу, виконану з жаротривкої сталі при вимірі високих і середніх температур чи із щільного картону для одноразових термопар при вимірі температури рідких металевих розплавів (сталі, чавуна й ін.);
- спай робочого кінця повинний мати гарний тепловий контакт із нижньою частиною захисної гільзи (чохла) для зменшення інерційності термопар. Стандартні термопари мають наступні значення теплової інерції: малоінерційне - 5 с, середньої інерційності - до 60 с, великої інерційності - до 180 с.
- конструкція лабораторних термопар (підвищеної точності) повинна забезпечувати можливість термостатування вільних кінців

# ТЕРМОМЕТРИ НА рп-ПЕРЕХОДАХ

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



Рис. 1.1. Структурна схема електронного термометра

# Принцип роботи діодного термометра

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

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

- де  $I$  — струм через діод;  $V$  — прикладена напруга;
- $I_s$  — зворотний струм насичення (функція температури);
- $k$  — п

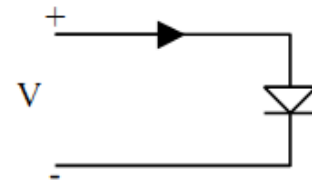
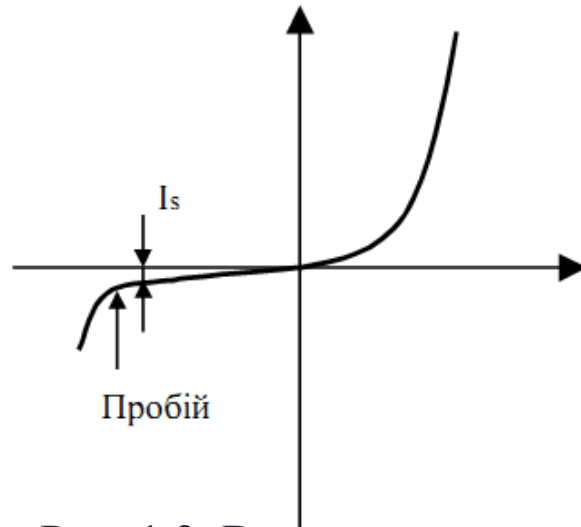


Рис. 1.2. Вольт-амперна характеристика кремнієвого діода

- Розв'язавши 1-ше рівняння відносно  $V$ , одержуємо: 
$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{4,6kT}{q} (\ln M - \ln I)$$

- де  $M$  — деяка незалежна від температури константа і  $E_g$  — ширина забороненої зони в кремнії при  $T = 0$  К.
- Відповідно напруга на діоді лінійно залежить від температури.

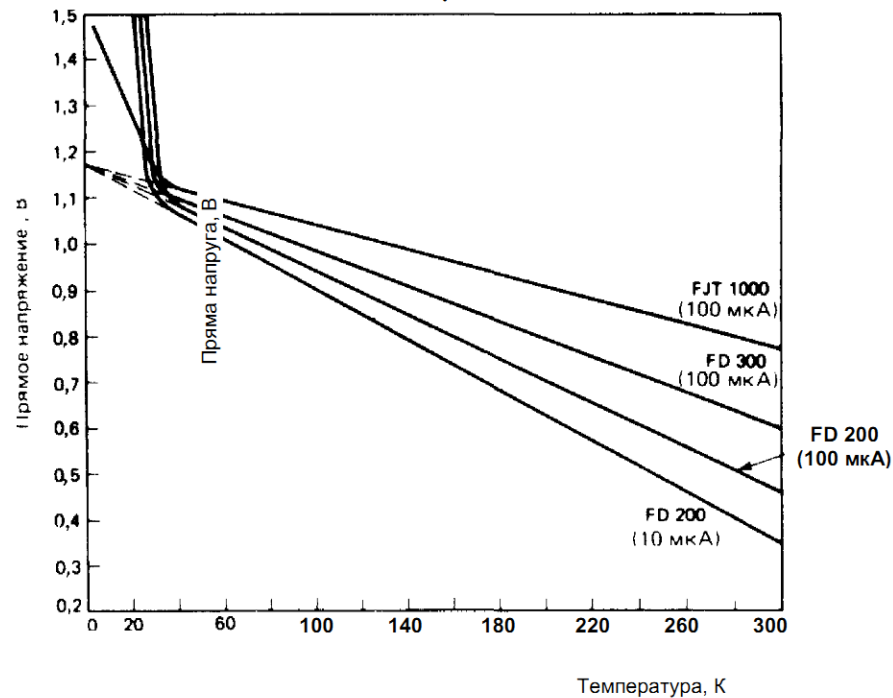


Рис. 1.3. Температурні характеристики кремнієвих діодів фірми Fairchild Semiconductor.

## 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:
  1. Визначаються значення  $V_{BE}$  на границях робочого інтервалу температур (наприклад, при  $T = -40^{\circ}\text{C}$  і  $T = 150^{\circ}\text{C}$ ).
  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  $T_c = -2,25 + 0,0033 * (V_{BE} - 600)$  мВ/ $^{\circ}\text{C}$ .
  4. Температура  $T_x$ , що відповідає будь-якому вимірюваному значенню  $V_{BE}(T_x)$ , розраховується по формулі чи визначається з графіка.
  5.  $T_x = [V_{BE}(T_x) - V_{BE}(25^{\circ}\text{C})] / T_c + 25$ .

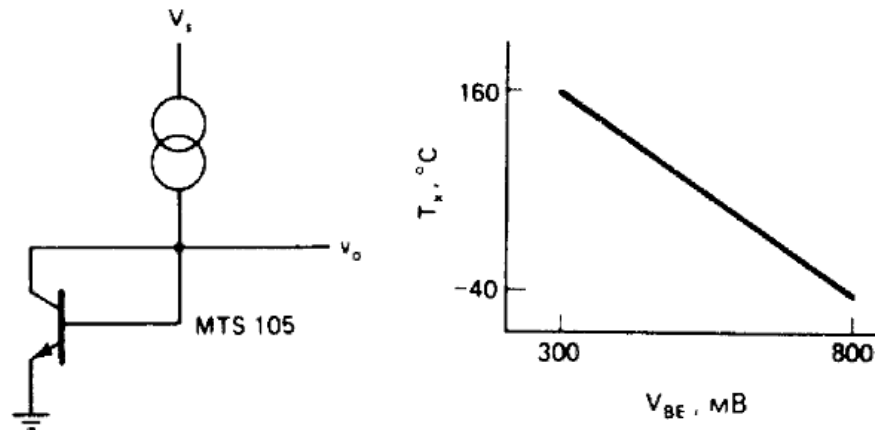


Рис. 1.4. Температурна залежність напруги база - емітер для включеного діодом транзистора МТ 105 фірми Motorola.



# 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°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:

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

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

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

- вирішуючи рівняння (1.4) 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).

# 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 представлена схема термометра з використанням як датчика транзистора MTS 105.

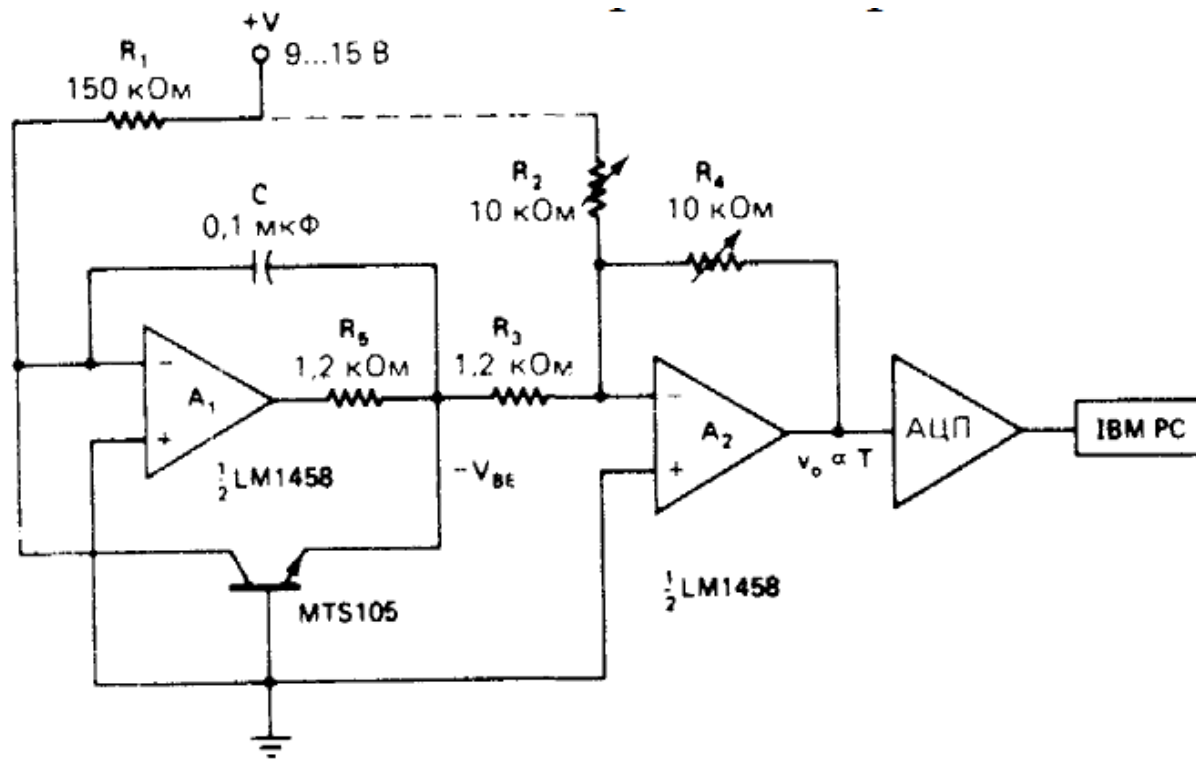


Рис. 1.5. Принципова схема транзисторного термометра

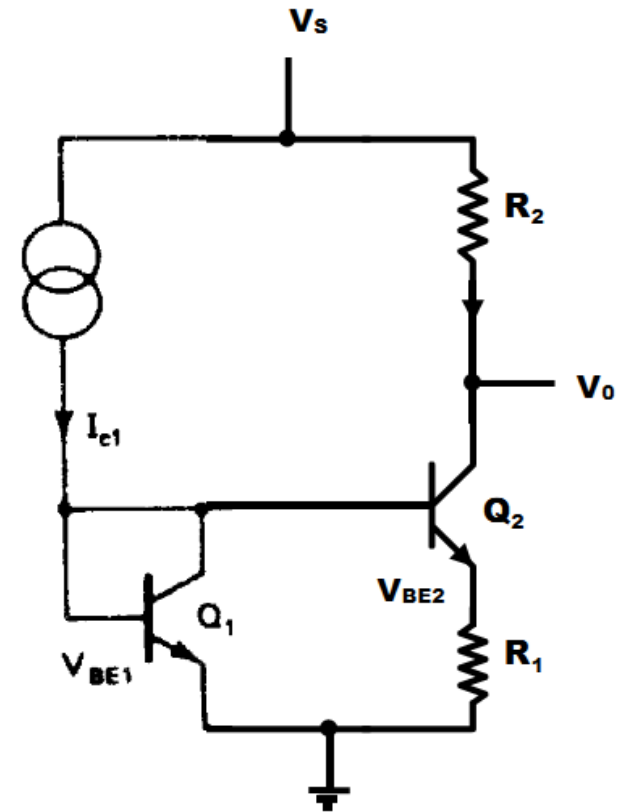
# Транзистор як датчик температури

- Резистор R1 визначає колекторний струм транзисторного датчика. Цей резистор повинний мати високу стабільність і низький температурний коефіцієнт опору (наприклад, металоплівковий резистор). Операційні підсилювачі A1 і A2 повинні мати малий дрейф (типу LM1458). На виході ОП A1 буде діяти напруга VBE. Ця напруга підсилюється ОП A2. За допомогою потенціометра R4 регулюється коефіцієнт підсилення цього ОУ для підтримки вихідного сигналу в межах границь насичення. Якщо в схему ввести потенціометр R2, 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 R5 і Z запобігають самозбудженню схем. Напруга живлення + V повинна бути дуже стабільною.
- Для калібрування транзисторний датчик занурюється в крижану ванну, і за допомогою потенціометра R2 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 R4 — 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. Вихідна напруга  $v_0$  подається на вхід АЦП.

# ІНТЕГРАЛЬНІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ

- На рис. 2.1 показана проста термочутлива схема, використовувана для одержання вихідної напруги, пропорційної абсолютній температурі. Для ідентичних кремнієвих транзисторів  $Q_1$  і  $Q_2$ , нехтуючи їхніми базовими струмами в 
$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{E1}}{I_{E2}} = \frac{\exp(qV_{BE1} / 2kT)}{\exp(qV_{BE2} / 2kT)}$$
, одержуємо

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



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.
- На рис. 2.2 показана типова схема включення цих датчиків при вимірах температури. Вихідний сигнал цієї ІС можна представити у виді

$$v_0(T) = v_0(T_0) \frac{T}{T_0}$$

- 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.

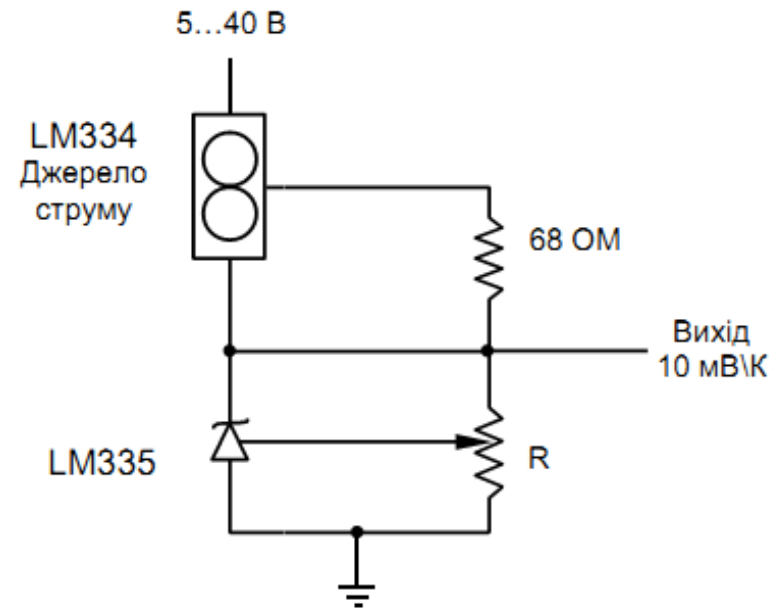


Рис. 2.2 Типова схема використання інтегрального датчика температури ІС LM335 (вихідний сигнал — напруга).

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!!!