



ОСНОВИ СЕНСОРИКИ

6. ТЕМПЕРАТУРНІ СЕНСОРИ

Застосування

- Більшість процесів в індустрії йде зараз по шляху автоматизації і роботизації, тобто управління численними механізмами і агрегатами, а на разі і технологічними процесами та виробництвами в цілому, просто немислимо без точних вимірювань всіляких фізичних величин.
- Найпоширеними є пристрої вимірювання тиску, кутової, а також лінійної швидкості, прискорення, вологості і багато інших.
- Але найпоширенішими (близько 50%) є температурні виміри, – велика кількість процесів в індустрії, на транспорті та в побуті потребують вимірювання температури, наприклад:
 - підтримка процесів виготовлення різноманітної продукції, в тому числі, в електроніці, машино– та приладобудуванні, переробка сировини та продуктів, біомедичні додатки та ін.;
 - регулювання опалення та кондиціонування на основі вимірювання температури теплоносія на вході і на виході, а також температури в приміщенні;
 - регулювання температури приладів та процесів в побуті та ін.

Приміром, середня за величиною атомна станція налічує приблизно 2000 контрольних (вимірювальних) точок, а велике хімічне виробництво, налічує таких вже більше 15 тис.

Принципи

- Безпосередньо температуру виміряти неможливо.
 - Про її зміну судять по зміні інших фізичних властивостей тіл (об'єму, тиску, електричного опору, ЄРС, інтенсивності випромінювання тощо), пов'язаних з температурою певними закономірностями.
 - Тому методи вимірювання температури є по суті методами вимірювання зазначених вище термометричних властивостей.
- Залежність властивостей багатьох матеріалів від температури не завжди являється недоліком – з таких матеріалів виготовлюються датчики температури.
- В залежності від методики вимірювань термометри поділяються на дві основні групи:
 - Контактні термометри, чутливі елементи яких вступають у безпосередній тепловий контакт з об'єктом вимірювання;
 - Безконтактні термометри, що вимірюють дистанційно інтенсивність інтегрального теплового випромінювання об'єкту;
 - Особливу групу складають спеціальні термометри, що використовують для вимірювання наднизьких температур.

Електричні способи

- Всі ці прилади і методики за принципом дії розділяються на декілька груп.
- Але з огляду на специфіку дисципліни, ми розглянемо тільки деякі з них:
 - термоелектричні перетворювачі,
 - термометри опору – термометри, принципом дії яких є
 - вимірювання зміни опору провідника
 - або напівпровідникового приладу зі зміною температури,
 - та безконтактні вимірювачі інфрачервоного випромінювання.

ОСНОВНІ ТИПИ

- Як правило, в будь-яких додатках, застосовуються чотири типи аналогових сенсорів температури:
 - термоелектричні елементи;
 - резистивні детектори температури;
 - термістори;
 - напівпровідникові сенсори температури.



Типи та характеристика

Термопари	РДТ (резистивні датчики температури)	Термістори	Напівпровідникові датчики температури
Діапазон температур ($-184^{\circ}\text{C} \dots +2300^{\circ}\text{C}$)	Діапазон: -200°C до 850°C	Діапазон: $-200^{\circ} \dots 850^{\circ}\text{C}$	Діапазон: $-55^{\circ} \dots 150^{\circ}\text{C}$
Висока точність і повторюваність	Висока лінійність	Низька лінійність	Достатньо висока точність та лінійність
Необхідність компенсації холодного спаю	Потрібне зовнішнє живлення	Потрібне зовнішнє живлення	Потрібне зовнішнє живлення
Низька вихідна напруга	Низька вартість	Висока чутливість	Вихідний сигнал близько $10 \text{ мА(В)/}^{\circ}\text{C}$

Термоелектричні термометри.

- Принцип дії термоелектричних термометрів базується на використанні в якості чутливого елемента термопар.
- Термоелектричні перетворювачі мають дуже широкий діапазон вимірювання – $200^{\circ}\dots+2200^{\circ}\text{C}$ (короткочасно до 2500°C), можуть вимірювати температуру у точці об'єкта або вимірюваного середовища, мають відносно малі габаритні розміри – від 0,5 мм (великі діаметри захисних оболонок визначаються вимогами механічної і термічної міцності).
- Термоелектричні перетворювачі відрізняються достатньо високою точністю і стабільністю характеристик перетворення, хоча вони і поступаються трохи за цими показниками термоперетворювачам опору.
- *До числа недоліків необхідно віднести необхідність використання спеціальних термоелектродних провідників для підключення перетворювачів до вимірювального приладу і необхідність стабілізації або автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців.*

Резистивні датчики температури (РДТ)

- **Термометр опору** це прилад для вимірювання температури, на основі чутливого елемента (первинного вимірювального перетворювача), електричний опір якого залежить від температури.
 - Матеріалом для терморезисторів є різні метали, сплави, композити та напівпровідники. В останньому випадку їх називають термісторами.
- Хамфрі Деві, британський фізик і хімік, один із засновників електрохімії, ще в 1821 році встановив залежність електричного опору провідника від довжини й перетину й відзначив залежність електропровідності різних металів від температури.
- Вільям Сіменс, німецький та англійський вчений, засновник відомої фірми, в 1871 році розробив перший платиновий термометр опору (ПТО, РТС).
 - А в 1887 році Хью Каллендар опублікував статтю, в якій він описав способи практичного застосування платинових термометрів.
- Розроблений Сіменсом платиновий термометр опору до сього часу використовується для прецизійних вимірювань завдяки простоті конструкції, надійності, повторюваності і достатньо високим характеристикам.

Резистивні датчики температури (РДТ)

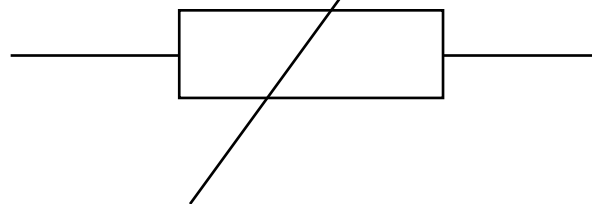
- Стандартні *платинові* терморезистори використовують для вимірювання температури в діапазоні від мінус 260 до плюс 1100°C, а мідні – в діапазоні від мінус 200 до плюс 200°C (ДСТУ 6651–78), низькотемпературні платинові терморезистори використовують для вимірювання температури в межах від мінус 261 до 183°C (ДСТУ 12877–76).
- Залежність опору провідника від його температури у найпростішому випадку виражається лінійною залежністю:
 - $R_T = R_0(1 + a \Delta T)$,
 - де: R_T – електричний опір при температурі T [Ом];
 - R_0 – електричний опір при початковій температурі T_0 [Ом];
 - a – температурний коефіцієнт електричного опору [$^{\circ}\text{K}^{-1}$], (для платини $a=0,004$);
 - ΔT – зміна температури, що становить $T-T_0$ [$^{\circ}\text{K}$].

Резистивні датчики температури (РДТ)

- Матеріали, які використовуються для виготовлення термометрів опору, повинні мати:
 - максимальний і постійний температурний коефіцієнт електричного опору,
 - лінійну залежність опору від температури,
 - мати відтворюваність властивостей
 - і інертність до впливів навколишнього середовища.
- У порівнянні з іншими датчиками РДТ відрізняються високою точністю.
 - Деякі з них дозволяють здійснити вимірювання з точністю до 0,026град. Найбільш поширені датчики мають часову нестабільність опору менш ніж 0,1град на рік, а деякі екземпляри - до 0,0025град на рік.
- *Для виготовлення термометрів опору, що мають позитивний температурний коефіцієнт, крім платини та інших дорогоцінних металів, використовують мідь, нікель, вольфрам та деякі сплави.*

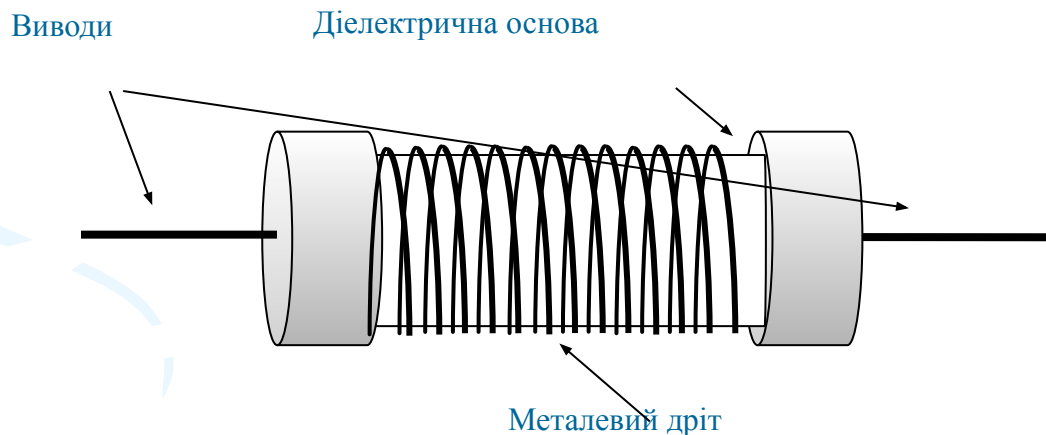
Резистивні датчики температури (РДТ)

- Термометри опору відносяться до одних із найточніших перетворювачів температури. Похибка вимірювання температури за допомогою термометра опору може складати $0,001^{\circ}\text{C}$.
 - До *переваг* платинових термометрів опору необхідно зарахувати доволі високу точність і стабільність характеристики перетворення, можливість вимірювати криогенні температури.
 - До *недоліків* – відносно великі розміри чутливого елемента, що не дає можливості вимірювати температуру в точці об'єкту чи середовища (діаметр оболонки дискретного чутливого елемента $2...20$ мм, довжина $6...100$ мм) та необхідність додаткового джерела живлення (останнє – відносно термодар).



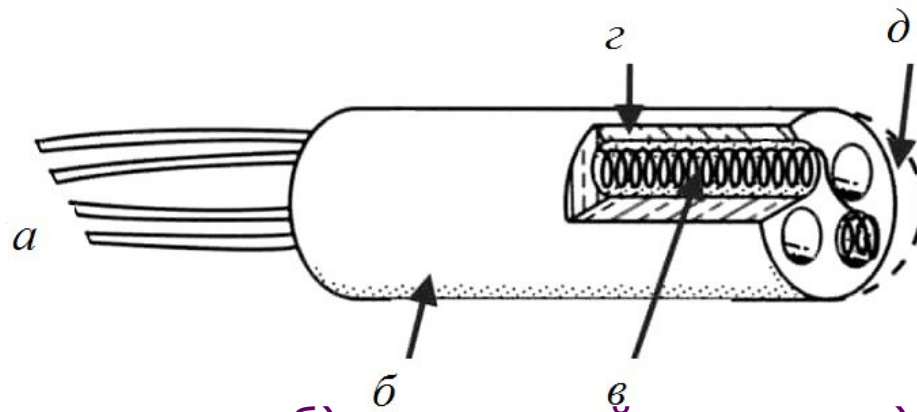
Резистивні датчики температури (РДТ)

- Типова конструкція дротового датчика температури з дротовими виводами складається з діелектричної обойми на якій розміщена спіраль, найчастіше, з високоомного матеріалу.
- Для захисту від зовнішнього середовища може застосовуватись ізоляційне покриття різними лаками і клеями.



Резистивні датчики температури (РДТ)

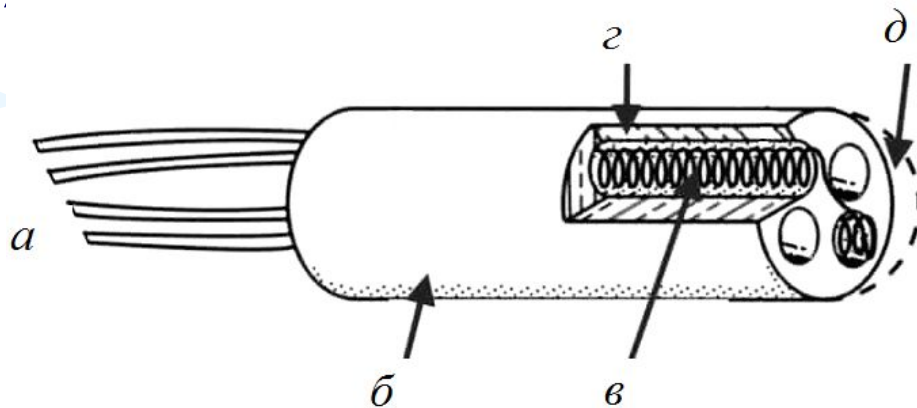
- Однак, деякі конструкції терморезисторів не такі прості, як здається на перший погляд. На якість вимірювання впливають багато факторів, які потрібно враховувати при виготовленні прецизійних приладів.
- Для усунення впливу зовнішніх факторів застосовують різноманітні конструкції, зокрема варіант, названий «вільна від напруження спіраль» (*Strain Free*).



а) – виводи термоелементу; б) – захисний корпус; в) – спіраль чутливого елементу; г) – дрібнодисперсний наповнювач; д) – герметизуючий компаунд

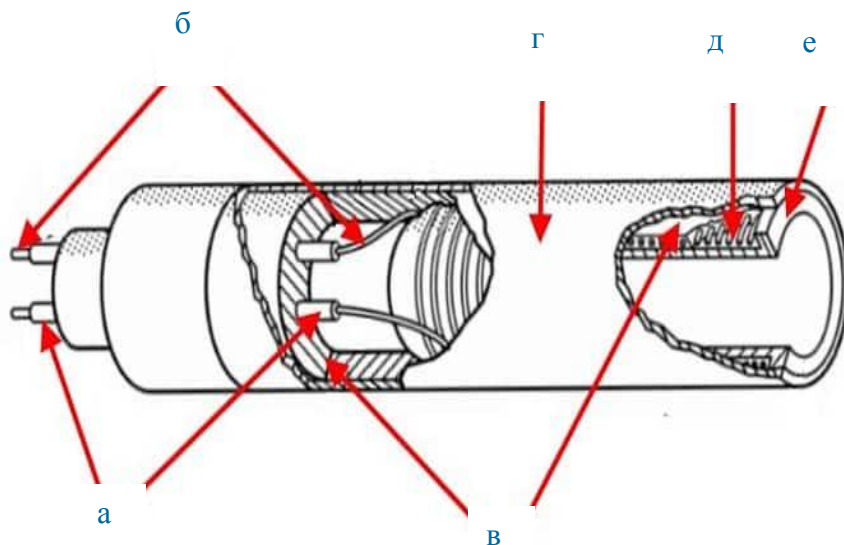
Резистивні датчики температури (РДТ)

- Як видно з рисунку, чотири спіралі з платиного дроту розміщені в спеціальних каналах, що заповнені дрібнодисперсним наповнювачем (оксид алюмінію, Al_2O_3).
- Наповнювач забезпечує ізоляцію проміж витками дроту, а також виконує роль амортизатору при вібраціях, або коли відбувається розтягнення дроту внаслідок розігріву.
- Для герметизації застосовується спеціальний компаунд (гласур)



Резистивні датчики температури (РДТ)

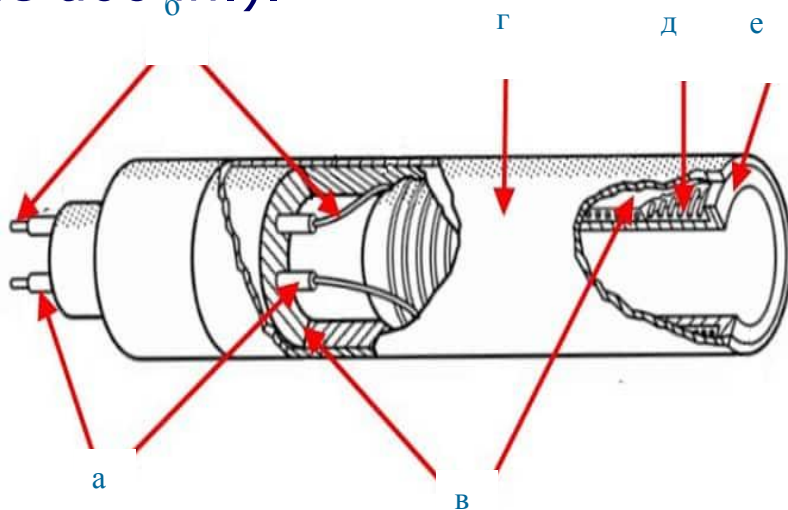
- Існує інший, відносно новий варіант виконання – *Hollow Anvilus* (порожня структура), що застосовується на об'єктах особливої важливості, зокрема, на атомних станціях.
- Головна відмінність такого типу датчиків – висока надійність та стабільність характеристик.
- В інших сферах датчики такої конструкції не застосовуються через високу вартість виробів.



а) – виводи термоелементу; б) – ізоляція виводів; в) – ізолюючий дрібнодисперсний наповнювач; г) – захисний корпус; д) – спіраль чутливого елементу; е) – металевий циліндр

Резистивні датчики температури (РДТ)

- Чутливим елементом цієї конструкції є металевий циліндр, вкритий шаром ізоляції, на поверхні якого намотана платинова спіраль.
- В якості матеріалу циліндру використовується сплав з температурним коефіцієнтом розширення близьким до платини. Ізоляційне покриття (Al_2O_3) формується за технологією гарячого запилення.
- Зібраний датчик герметизується в корпусі.
- Така конструкція має доволі низьку інерційність, що знаходиться в діапазоні від 0,35...11,0 секунд в залежності від способу використання (занурюване, сухе, контактне або ін.).

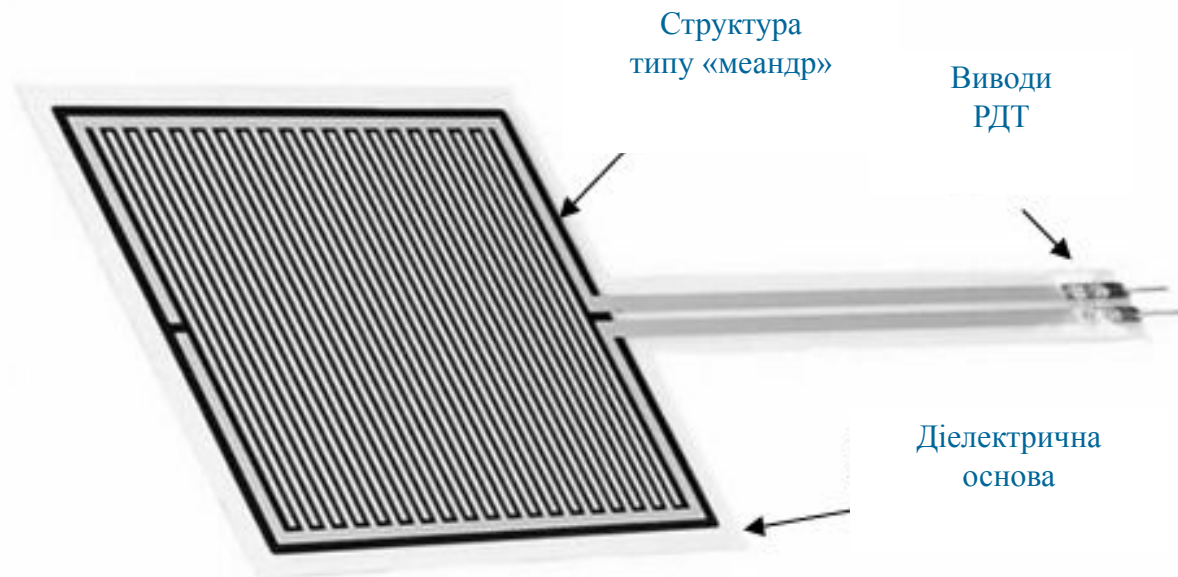


Плівкові резистивні датчики температури.

- Розвиток мікроелектроніки додав деякі особливості до конструкцій термометрів опору.
- На сьогодні значна їх кількість виготовляється за плівковою технологією, що надало можливість не тільки зменшити габарити приладів, а й інтегрувати їх до складу гібридних та напівпровідникових інтегральних схем.
- Зазвичай в якості основи для чутливого елемента використовують кераміку, полімери та інші діелектрики.
- На основі формується структура датчика температури з провідного шару, зазвичай у формі решітки, спіралі, або меандру. Виготовляють терморезистори за тонко – та товсто плівковою технологією.

Плівкові резистивні датчики температури.

- Найбільш розповсюджена конструкція плівкового сенсора, до переваг якої можна віднести невелику вартість та габарити.
- Крім того, плівкові сенсори мають малу інерційність і відносно великий опір завдяки малої площі перетину провідного шару.
- Наявність високого опору практично повністю нівелює вплив опору виводів на остаточні вимірювання.
- Однак, за ознакою стабільності, плівкова технологія на разі поступається дровим чутливим елементам.



Класи допуску за точністю на терморезистори

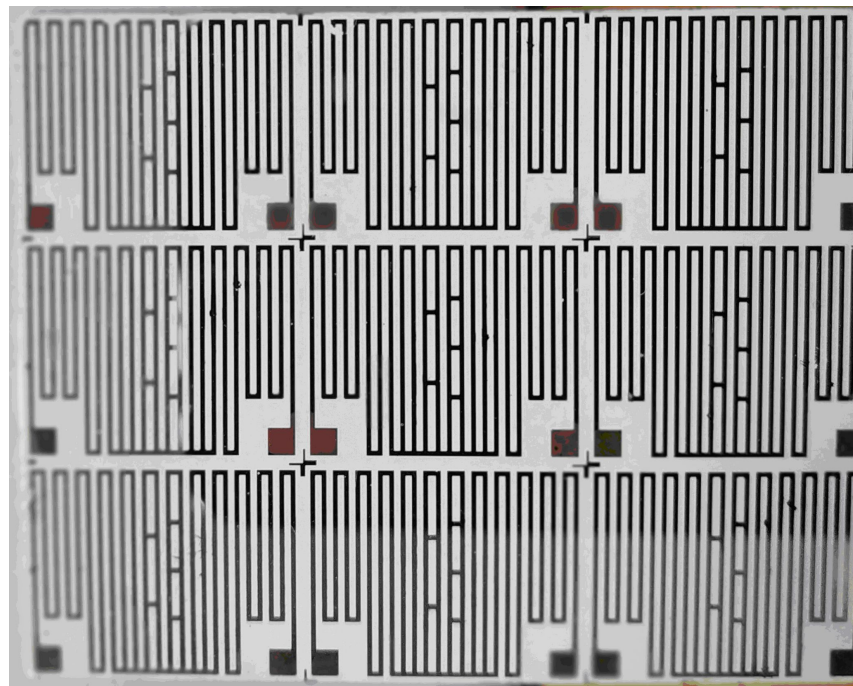
- Згідно з діючими нормами дозволяється відхилення характеристики сенсора температура – опір від лінійної.

Клас точності	Норми допуску, °C (T) +/-	Діапазон вимірювання температури, °C			
		Платинові сенсори		Мідні	Нікелеві
		Дротові	Плівкові		
AA	0,1+0,00017	-50...+250,,	-50...+150	-----	----
A	0,15+0,002	-100..+450	-30...+300	-50...+120	----
B	0,3+0,005	-196...+660	-50...+500	-50...+200	----
C	0,5+0,01	-196...+660	-50...+600	-180...+200	-60...+180

Плівкові резистивні датчики температури.

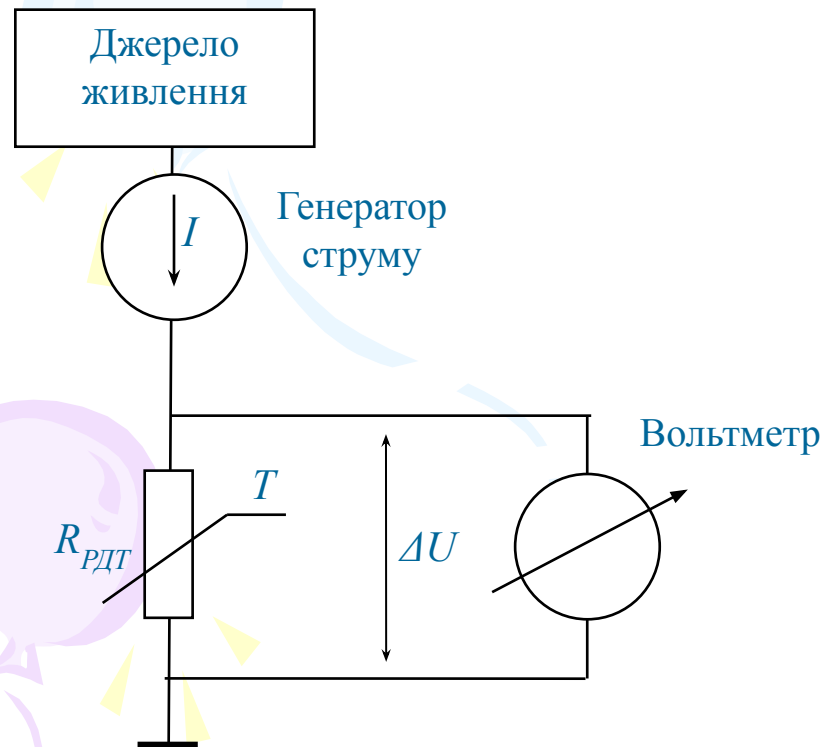
- Виготовляють плівкові РДТ груповим методом на вакуумному обладнанні.
- *На фото наведено фрагмент масиву терморезисторів, виконаних за тонко плівковою технологією в лабораторії кафедри МЕЕПП, ХНУРЕ.*

Фрагмент масиву терморезисторів, виконаних за тонко плівковою технологією (розмір одного елемента 4x5 мм)



Плівкові резистивні датчики температури.

- РДТ відносяться до параметричних, тому для їх роботи необхідна напруга збудження.
 - Приклад схеми вимірювання.



За такої схеми відрахування зміни температури ΔT відбувається за показами вольтметра ΔU :

$$\Delta T = k \cdot \Delta U = k \cdot \Delta R_{РДТ} \cdot I$$

Плівкові резистивні датчики температури.

- За умови, що струм живлення схеми вимірювання постійний, покази вольтметра можна було б проградуювати безпосередньо в градусах.
- Однак, за такої схеми живлення в наведеній формулі не враховано той факт, що під час вимірювання на резисторі виділяється деяка потужність що, в свою чергу йде на розігрів самого датчика температури:
 - $P = U_d I$.
- *Таким чином, виникає колізія: з одного боку, для підвищення надійності вимірювань, необхідно підвищувати струм через датчик, з іншого, підвищення струму веде до само розігріву первинного перетворювача, що спотворює результати вимірювань. Тому величину струму збудження вибирають виходячи з конкретних умов вимірювання. Зокрема, принципове значення має теплопровідність середовища (повітря, вода, вид контакту з об'єктом вимірювання), в якому знаходиться датчик. Рекомендоване значення струму збудження вказується виробником датчика. Типові значення становлять 250 мкА для платинових і нікелевих перетворювачів і 1 мА для мідних. Гранична величина робочого струму для деяких типів термоперетворювачів становить 5 мА.*
- *Існує також підхід, що дозволяє ще більше зменшити похибку від само розігріву – це імпульсне живлення первинного перетворювача. Це значно ускладнює електричну схему, але і значно міже підвищити точність вимірювання температури*

Термістори

- Термін термистор утворився в результаті з'єднання двох слів: тепло– та резистор.
- Термістори відносяться до класу датчиків абсолютної температури, показники яких відповідають абсолютній температурній шкалі. *(Абсолютна температура – температура, яка відлічується від абсолютного нуля.)*
- *Поняття "Абсолютна температура" було введено в 1848 У. Томсоном на підставі другого закону термодинаміки.*
- *Абсолютну температуру можна вимірювати за різними шкалами.*
- *Міжнародне визнання отримали термодинамічна і міжнародна практична температурні шкали. По обох шкалах одиницею абсолютної температури є Кельвін (K)*

Термістори

- Все термістори поділяються на дві категорії: з негативним температурним коефіцієнтом (НТК, NTC) і з позитивним температурним коефіцієнтом (ПТК, PTC) опору.
 - Для проведення прецизійних вимірювань використовуються термістори тільки з НТК.
- Перший термістор з негативним температурним коефіцієнтом був створений у 1833 році Майклом Фарадеєм, який виявив напівпровідникову поведінку сульфїду срібла.
 - Фарадей помітив, що опір сульфїду срібла різко зменшується при підвищенні температури (це дослідження було також першим задокументованим спостереженням напівпровідникового матеріалу).
- Оскільки перші термістори були складними у виготовленні внаслідок окладної технології, їх застосування було обмеженим.
 - Промислове виробництво термісторів почалося лише після 1930 року.
 - Перший життєздатний комерційний зразок термістора був винайдений Самуелем Рубеном у 1930 році (U.S. Patent 2 021 491).
 - Для виготовлення напівпровідникових термісторів застосовують окисли металів (Mn_2O_3 , Cu_2O_3 , Fe_2O_3 і ін.), що прасуються і спікаються при вискій температурі.

Термістори

- Для термістора характерні малі розміри, великий температурний коефіцієнт опору (ТКО) (у десятки раз перевищує цей коефіцієнт для металів), простота використання, здатність працювати в різних кліматичних умовах при значних механічних навантаженнях, стабільність характеристик у часі.
- Термістори виготовляють у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб, намистинок і тонких пластинок переважно методами порошкової металургії. Їхні розміри можуть варіюватися в межах від 1...10 мкм до 1...2 см.
- Основними параметрами термістора є: номінальний опір, температурний коефіцієнт опору, інтервал робочих температур, максимально припустима потужність розсіювання.
- Термістори з негативним ТКО виготовляють із суміші полікристалічних оксидів перехідних металів (наприклад, MnO , CoO , NiO , CuO), легованих Ge і Si , напівпровідників типу AIII BV, скловидних напівпровідників і інших матеріалів.
- Існують термістори низькотемпературні (розраховані на роботу при температурах нижче 170 K), середньо температурні (170...510 K) і високотемпературні (вище 570 K). Крім того, існують термістори, призначені для роботи при 4,2 K и нижче та при 900...1300 K.
- Найбільш широко використовуються середньо температурні термістори із ТКО від 2,4 до 8,4%/ K і номінальним опором до 10МОм.

Термістори

- Режим роботи термісторів залежить від того, на якій ділянці статичної вольт-амперної характеристики обрана робоча точка.
- У свою чергу ВАХ залежить як від конструкції, розмірів і основних параметрів термістора, так і від температури, теплопровідності навколишнього середовища, тепловому зв'язку між термістором і середовищем.
- Термістори з робочою точкою на початковій (лінійній) ділянці ВАХ використовуються для вимірювання й контролю температури та компенсації температурних змін параметрів електричних кіл і електронних приладів.
- Термістори з робочою точкою на спадній ділянці ВАХ (з негативним опором) застосовуються як пускові реле, реле температури, вимірювачі потужності електромагнітного випромінювання на НВЧ, стабілізатори температури й напруги.
- Режим роботи термістора, при якому робоча точка перебуває також на спадаючій ділянці ВАХ (при цьому використовується залежність опору терморезистора від температури й теплопровідності навколишнього середовища), характерний для термісторів, застосовуваних у системах теплового контролю й пожежної сигналізації, регулювання рівня рідких і сипучих середовищ; дія таких приладів заснована на виникненні релейного ефекту в колі з термістором при зміні температури навколишнього середовища або умов теплообміну термістора з середовищем.

Термістори

- При проведенні прецизійних вимірів або при роботі в широкому температурному діапазоні не можна безпосередньо використовувати характеристики термістора, наведені в документації на них, оскільки типові допуски на номінальні значення серійних виробів при температурі 25°C становлять близько $\pm 20\%$ і більше.
- Тому для досягнення високої точності вимірювань термістори необхідно індивідуально калібрувати в широкому температурному діапазоні.
- Правда, існують і прецизійні термістори, характеристики яких в заводських умовах підганяються методом шліфування до необхідних значень.
- Цей процес проводиться під безперервним контролем за номінальними значеннями опорів при заданій температурі.

Термістори

- При використанні термістора в якості датчика абсолютної температури передбачається, що при проходженні через нього електричного струму, його власна температура не зміниться, що означає, що він не внесе в систему значних теплових збурень, здатних вплинути на точність вимірювань. У цьому випадку говорять, що термістор має «нульову потужність».
- Для виконання умов «нульовий потужності» необхідно, щоб:
 - термістор мав високий питомий опір,
 - термістор і об'єкт вимірювання мали добрий тепловий контакт один з одним,
 - вимірювання проводилися за невеликим постійним струмом, що подається протягом короткого інтервалу часу.

Термістори

- При використанні термісторів в будь-яких вимірювальних системах необхідно знати їх передавальні функції, які є аналітичними виразами, що зв'язують величину опору і температуру.
- Термістор має кращу чутливість за низьких температур, тоді як при збільшенні температури його чутливість різко падає.
- У термісторах з НТК чутливість в усьому температурному діапазоні змінюється від $2\%/^{\circ}\text{C}$ (в зоні високих температур шкали) до $8\%/^{\circ}\text{C}$ (в зоні низьких температур шкали), тому можна стверджувати, що термістори є дуже чутливими пристроями, майже на порядок більш чутливими в порівнянні з РДТ

Термістори

Опір, Ом

Тип	Pt100 404	Pt1000 501	PTC 201	NTC 101	NTC 102	NTC 103	NTC 104	NTC 105
Температура, °C								
-50	80,31	803,1	1032					
0	100,00	1000,0	1628	23868	6536			
10	103,90	1039,0	1771	14130	3986			
25	109,73	1097,3	2000	6800			15000	
50	119,40	1194,0	2415				5039	
100	138,50	1385,0	3390					
200	175,84	1758,4						

Градуювання датчиків температури здійснюється із застосуванням спеціальної таблиці градування – Міжнародної практичної шкали температур (IPTS-68)

IPTS-68

Реперна точка		T ₉₀ /K	t ₉₀ /°C
e-H ₂	Трійна точка	13.8033	-259.3467
e-H ₂	Тиск пару	≈17	≈ -256.15
e-H ₂	Тиск пару	≈20.3	≈ -252.85
Ne	Трійна точка	24.5561	-248.5939
O ₂	Трійна точка	54.3584	-218.7916
Ar	Трійна точка	83.8058	-189.3442
Hg	Трійна точка	234.3156	-38.8344
H ₂ O	Трійна точка	273.16	0.01
Ga	Точка плавлення	302.9146	29.7646
In	Точка затвердіння	429.7485	156.5985
Sn	Точка затвердіння	505.078	231.928
Zn	Точка затвердіння	692.677	419.527
Al	Точка затвердіння	933.473	660.323
Ag	Точка затвердіння	1234.93	961.78
Au	Точка затвердіння	1337.33	1064.18
Cu	Точка затвердіння	1357.77	1084.62

Завдання

- Що таке вимірювальний перетворювач, сенсор, датчик? Дайте визначення. Пояснить, яка різниця в формулюваннях?
- Узагальнена структура сенсора. Основні вимоги до сенсорів?
- Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів.
- Які особливості критеріїв класифікації розробника електронних систем і розробника ПП?
- Які характеристики прийняті в якості *класифікаційних ознак* ПП?
- Класифікація ПП за вимірюваним параметром.
- Класифікація ПП за принципом дії, характером вихідного сигналу.
- Класифікація ПП за середовищем передачі інформації, кількістю вхідних величин і технологією виготовлення.
- Параметричні і генераторні первинні вимірювальні перетворювачі.