

**ЛЕКЦІЯ № 3**  
з навчальної дисципліни  
**«Архітектура і технології IoT»**

**Тема лекції: Засоби вимірювань (датчики) в IoT**

**Питання лекції**

1. Загальні відомості про датчики
2. Основні характеристики датчиків
3. Класифікація датчиків
4. Технологія MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)

**ВСТУП**

Особливу роль в «Інтернеті Речей» відіграють засоби вимірювання, що забезпечують перетворення відомостей про зовнішнє середовище в дані зрозумілі для ЕОМ, і тим самим здатні наповнити обчислювальне середовище цінною інформацією. Зараз використовується широкий клас засобів вимірювання, від елементарних датчиків (наприклад, температури, тиску, освітленості), приладів обліку споживання (таких, як інтелектуальні лічильники) до складних інтегрованих вимірювальних систем. В рамках концепції «Інтернету Речей» принциповим є об'єднання засобів вимірювання в мережі (такі, як бездротові сенсорні мережі, вимірювальні комплекси), за рахунок чого можлива побудова систем міжмашинної взаємодії.

Як особлива практична проблема впровадження «Інтернету Речей» наголошується на необхідності забезпечення максимальної автономності засобів вимірювання, перш за все, проблема енергопостачання датчиків. Знаходження ефективних рішень, що забезпечують автономне живлення сенсорів (використання фотоелементів, перетворення енергії вібрації, повітряних потоків, використання бездротової передачі електрики), дозволяє масштабувати сенсорні мережі без підвищення витрат на обслуговування (у вигляді зміни батарейок або підзарядки акумуляторів датчиків).

Нещодавно в цій області був досягнутий великий успіх. Вчені анонсували придатний до комерційного використання наногенератор - гнучкий чіп, що перетворює в електроенергію людські рухи тіла (навіть одного пальця). Про це було оголошено в березні 2011 р на 241-их зборах Американського хімічного товариства. «Ця подія (створення наногенератора) стала важливою віхою на шляху до портативної електроніки, що використовує рух людського тіла для виробництва електроенергії, це дозволить обходитись без батарейок і розеток електричної мережі. В майбутньому наногенератори зможуть повністю змінити наше життя. Їх можливості обмежені лише рамками людської уяви». Чжун Лін Ван (Zhong Lin Wang) - провідний дослідник Технологічного інституту штату Джорджія.

Слід сказати, що на сьогоднішній день парадигма «Інтернету Речей» ще тільки набирає обертів, однак досить давно існує область науки, що займається здійсненням вимірів на відстані, яка носить назву **телеметрія**. Телеметрія пов'язана з вимірюванням і передачею на відстань результатів вимірювань різних фізичних величин, більшість з яких є неелектричними. Вимірювання цих параметрів в основному здійснюється електричними методами. Переважне використання електричних методів вимірювання обумовлено:

- зручністю перетворення електричних сигналів;
- високою точністю і чутливістю перетворювачів фізичних величин в електричні сигнали;
- малою інерційністю елементів електричного перетворювача;
- надійністю роботи схем;
- безперервністю вимірювання в часі;
- зручністю запису і накопичення інформації;
- широкими межами вимірювань і ін.

Як у телеметрії так і в «Інтернеті Речей» первинним джерелом інформації є датчик. Техніка конструювання і застосування датчиків (сенсорика), за останні роки розвилася у самостійну галузь вимірювальної техніки.

## 1. Загальні відомості про датчики

**Датчиком** називається інформаційний пристрій, що перетворює контрольований фізичний параметр в сигнал, зручний для подальшої обробки в каналі вимірювальної системи. *Досить часто зустрічаються і інші назви датчиків:* вимірювальний перетворювач, давач, детектор, вимірювач, чутливий елемент, зонд, сенсор, рецептор.

Датчик (рис.1) включає в себе чутливий елемент і перетворювач неелектричних величин в електричні сигнали (ПНВЕС). Часто між чутливим елементом і перетворювачем включається передавально-розмножувальний механізм, необхідний для підвищення чутливості датчика. Деякі датчики забезпечуються підсилювальними схемами, що грають таку ж роль.



Рис.1. Будова найпростішого датчика

У відповідності з ГОСТ 16263-70, “Сенсор” це пристрій, що називається первинним вимірювальним перетворювачем (primary measuring transducer), його частина на яку безпосередньо діє вимірювана величина, – чутливим

елементом (detector), а всі наступні складові вимірювального ланцюга – вимірювальним перетворюванням (measuring transducer).

Взагалі розрізняють **три класи датчиків**:

аналогові датчики, тобто датчики, які виробляють аналоговий сигнал;

цифрові датчики, що генерують на виході двійковий код вимірюємої величини;

сигнальні (бінарні, двійкові) датчики, які виробляють сигнал тільки двох рівнів: (0/1).

Однак для «Інтернету Речей» можуть використовуватись лише цифрові та сигнальні датчики. При цьому будова датчика (рис. 2) дещо ускладнюється і він набуває певних «інтелектуальних» властивостей.

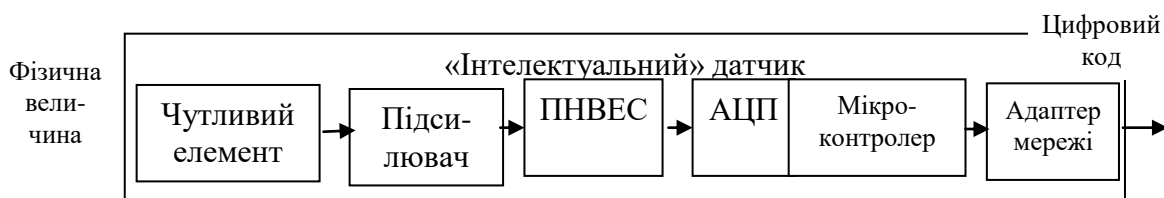


Рис.2. Будова цифрового «інтелектуального» датчика

Електричний сигнал за допомогою АЦП перетворюється в цифровий код який може оброблятися та коректуватися мікроконтролером (часто АЦП входить до складу мікроконтролера) та за допомогою адаптера мережі пристосовуватись для передачі по Інтернету.

Данні сигнального датчика можуть одразу ж передаватись через адаптер мережі.

Важливим фактором для подальшої інтерпретації результатів вимірів є їх прив'язка до часу. Тобто доцільно разом з кодом вимірів фізичних процесів передавати і час їх виміру.

Інколи можливо чи доцільно організувати вимірювальні системи (рис. 3) коли один мікроконтролер обслуговує декілька датчиків. У цьому випадку передбачають адресне розділення кожного вимірювального елемента.

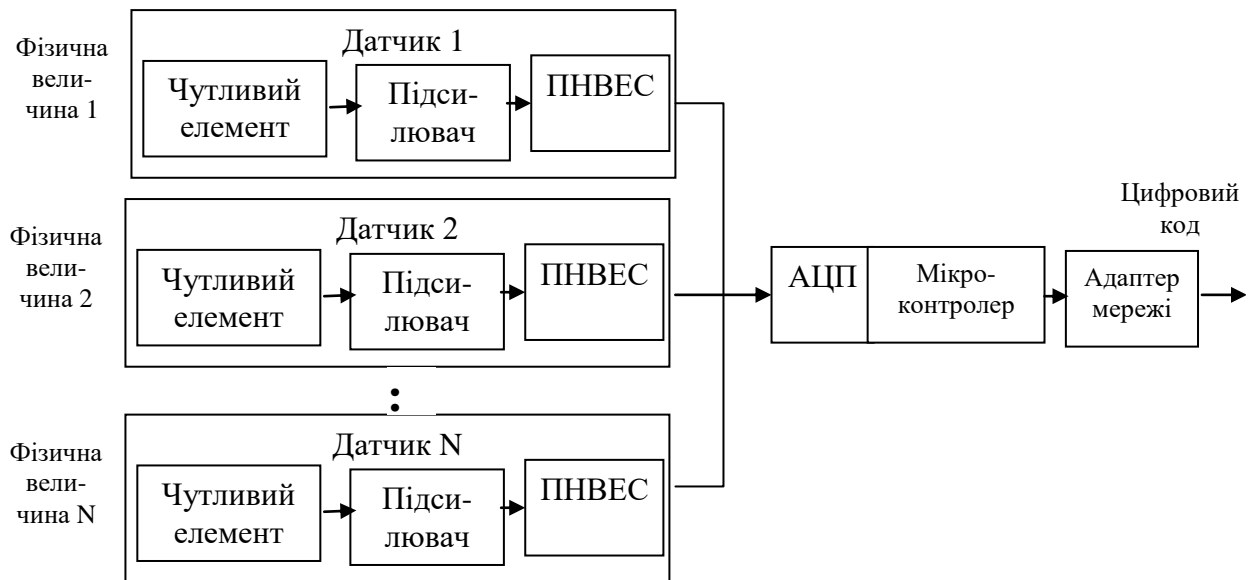


Рис. 3. Побудова вимірювальних схем

## 2. Основні характеристики (параметри) датчиків

Перейдемо до розгляду деяких характеристик датчиків. Вище зазначалося, що датчик можна вважати перетворювачем вимірюваної величини  $\lambda(t)$  у вихідний сигнал  $s(t)$ .

У динамічному режимі  $\lambda(t)$  і  $s(t)$  безупинно змінюються, і зв'язок між ними визначається диференціальним рівнянням, отриманим на основі фізичного принципу і схеми датчика:

$$f_1 [s^{(n)}, s^{(n-1)}, \dots, s] = f_2 [\lambda^{(m)}, \lambda^{(m-1)}, \dots, \lambda]. \quad (1.1)$$

У сталому (статичному) режимі вимірювання всі похідні  $\lambda$  і  $S$  обертаються в нуль і диференціальне рівняння переходить в алгебраїчне рівняння, що визначає статичну характеристику датчика,

$$f_1(s) = f_2(\lambda) \quad \text{або} \quad s = f(\lambda). \quad (1.2)$$

Тому прийнято виділяти статичні і динамічні характеристики датчиків.

### 2.1. Статичні характеристики датчиків

Статичні характеристики датчиків показують, наскільки коректно вихід датчика  $S$  відображає вимірювану величину  $\lambda$  через деякий час після її зміни, коли вихідний сигнал встановлюється у нове значення. Важливими статистичними параметрами є: чутливість, роздільна здатність, лінійність, дрейф, робочий діапазон, повторюваність і відтворюваність результату.

Статичну характеристику датчика прийнято називати **тарировочною (тарувальною)** характеристикою. Вона може бути лінійною і нелінійною. Для зручності обробки інформації бажано мати лінійну характеристику  $s = f(\lambda)$ . Лінеаризація проводиться зазвичай шляхом введення спеціальної корекції в різні ланки датчика.

**Чутливість** (sensitivity) датчика визначається як відношення величини зміни вихідного сигналу до одиничної зміни вхідної величини

$$s = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta s}{\Delta\lambda} \right) = \frac{ds}{d\lambda} . \quad (1.3)$$

**Роздільна здатність** (resolution) – це найменша зміна вимірюваної величини, котра може бути зафіксована і точно показана датчиком.

**Точність** (accuracy) визначає різницю між вимірюваною і дійсною величиною; вона може стосуватися датчика в цілому або конкретного його показника.

В процесі перетворення параметра  $\lambda$  в сигнал  $s$  виникають різні похибки, які складаються з методичних, динамічних та інструментальних похибок. У приладобудуванні точність датчиків оцінюють за допомогою приведеної відносної похибки, яка дорівнює відношенню абсолютної похибки до абсолютної величини діапазону вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{L_\lambda} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta s}{L_s} .$$

**Лінійність** (linearity) не описується аналітично, а визначається виходячи з градаційної кривої датчика. Статична градаційна крива показує залежність вихідного сигналу від вхідного при стаціонарних умовах. Наближення цієї кривої до прямої лінії і визначає ступінь лінійності.

**Статичне підсилення** (static gain) чи підсилення по постійному струму (d.c. gain) – це коефіцієнт підсилення датчика на дуже низьких частотах.

**Дрейф** (drift) визначається як відхилення показників датчика, коли вимірювана величина залишається постійною на протязі довготривалого моменту часу. Величина дрейфу може визначатися при нульовому, максимальному чи деякому проміжному значенні вхідного сигналу.

Деякі датчики через вплив сил тертя, люфтів і інших причин мають **зону нечутливості** (зону нульової чутливості). Для таких датчиків вводиться поняття порога чутливості, тобто мінімального збільшення параметра  $\lambda$  при якому сигнал  $s$  починає змінюватися. Ряд датчиків має статичну характеристику з петлею гістерезису.

## 2.2. Динамічні характеристики датчиків

Динамічні властивості датчика характеризуються цілим рядом параметрів, які, однак, доволі рідко наводяться в технічних описах виробників. З метою уніфікації методів динамічних випробувань і зіставлення характеристик різних датчиків прийнято реальний зовнішній вплив  $\lambda(t)$  замінювати **типовими вхідними діями**, основними з яких є **сходінкова, імпульсна і гармонійна**. Реакцію на типові впливи зазвичай визначають методом перетворення Лапласа при відомій передавальній функції датчика.

Динамічну характеристику датчика можна експериментально отримати з реакції на стрибок вимірюваної вхідної величини. Параметри, що описують реакцію датчика, дають уяву про його швидкодію (наприклад час нарощення, запізнювання, час досягнення першого максимуму), інерційних властивостей (відносне перерегулювання, час встановлення) і точності (зміщення).

Потрібно мінімізувати наступні параметри.

**Час проходження зони нечутливості (dead time)** – час між початком вимірювання фізичної величини і моментом реакції датчика, тобто моментом початку зміни вихідного сигналу.

**Запізнювання (delay time)** – час, через який показання датчика перший раз досягають 50 % значення, що встановилося. В літературі зустрічаються і інші визначення запізнення.

**Час нарощення (rise time)** – час, через який вихідний сигнал збільшується від 10 до 90 % значення, що встановилося. Інше визначення часу нарощення – величина, зворотна нахилу кривої реакції датчика на стрибок вимірювання величини в момент досягнення 50 % від значення, що встановилося, помножене на значення, що встановилося.

**Час досягнення першого максимуму (peak time)** – час досягнення першого максимуму вихідного сигналу (перерегулювання).

### **З точки зору «Інтернету Речей»**

Цінність IoT в тому, що це комплексне рішення, а дані, що надаються датчиком, грають в цьому комплексі ключову роль. Таким чином, проектувальнику абсолютно необхідно усвідомлювати, що це за дані і як їх правильно інтерпретувати.

Крім розуміння того, які дані збираються і як вони утворюються в масиві IoT, корисно знати, що саме і в яких межах вимірюється. Наприклад, система повинна враховувати пристрої, які втратили зв'язок, і помилкові дані.

Проектувальник повинен розуміти причини, за якими дані, отримані від датчиків, можуть бути ненадійними, а також причини, внаслідок яких польовий датчик може вийти з ладу. По суті, ми з'єднуємо аналоговий світ з цифровим. Більшість аналогових пристроїв, що інтегруються в цифровому просторі, це датчики, тому важливо розуміти їх роль і значення.

У двох словах про те, що таке IoT. Кількість датчиків і виконавчих пристроїв, об'єднаних в єдину мережу, значно зросла, тому проектувальнику надзвичайно важливо розуміти їх взаємодію.

Кожен повинен запитати себе: «Який тип датчика або кінцевого пристрою слід використовувати для вирішення проблеми, яка стоїть переді мною? »

### 3. Класифікація датчиків

*Залежно від методу перетворення неелектричних величин в електричні сигнали розрізняють параметричні й генераторні датчики.*

У **параметричних** датчиках зміна фізичної величини перетвориться в відповідну зміну будь-якого параметра електричного кола, що живиться від зовнішнього джерела. Такими параметрами зазвичай є опір, ємність або індуктивність.

У **генераторних** датчиках відбувається безпосереднє перетворення фізичних величин в електричні сигнали без використання зовнішніх джерел живлення.

*За характером вихідних електричних сигналів розрізняють датчики постійного і змінного струму. Перші іноді ототожнюють тільки з потенціометричними датчиками, хоча клас датчиків постійного струму значно ширше.*

*За способом подання інформації датчики діляться на аналогові і цифрові.*

В **аналогових** датчиках вихідний електричний сигнал є аналогом вимірюваної фізичної величини. Якщо параметр змінюється безперервно, то вихідний сигнал такого Датчика зазнає такі ж зміни.

У **цифрових** датчиках при плавній зміні вхідної величини вихідний сигнал змінюється дискретно і представляється зазвичай у вигляді двійкового коду.

Більшість з вживаних в «Інтернеті Речей» датчиків відноситься до цифрових.

*За видом отримуючої енергії:* активні і пасивні перетворювачі

Пасивний отримує енергію від об'єкту дослідження (вимірюваної величини) / фотодіод. Активний – має зовнішнє живлення (фоторезистор).

*За розмірністю у просторі:*

одиночні (точкові);

одномірні (розміщені вздовж однієї лінії, датчик фотоприймачів сканера);

двомірні (ПЗЗ – матриця цифрового фотоапарату);

об'ємні (набір шарів датчиків, детектори космічних променів).

*За видом дії на об'єкт виміру (локалізації):*

контактні та ємнісні

дистанційні (випромінювач/не обов'язково/ + приймач).

*За фізичним принципом дії (фізичним явищем) датчиків або за типом застосовуваних перетворювачів датчики діляться на: контактні (сигнальні), омічні, індуктивні, ємнісні, індукційні, фотоелектричні, термоелектричні,*

іонізаційні оптоелектричні, акустоелектричні, п'єзоелектричні, електромагнітні, магнітоелектричні і ін.

1) **Ємнісні** перетворювачі: зміна входної величини – зміна  $C$  – напруга.

$$C = \epsilon A / x$$

, де  $\epsilon$  – діелектрична проникливість діелектрика,  $A$  – площа кожної пластини,  $x$  – відстань між пластинами. Величини  $\epsilon$ ,  $A$ ,  $x$  – залежать від вологості, температури, переміщення. Матриці ємнісних датчиків чутливі до зовнішніх об'єктів на відстанях 10-15 мм.

2) **Іонізаційні** перетворювачі. В газі, рідині або твердому тілі при дії іонізуючого випромінювання виникає струм іонізації між електродами.

3) **Електромагнітні** перетворювачі. Провідник рухається у магнітному полі, тому генеруються електрорушійна сила (ерс). (мікрофони)

4) **Електромеханічні** перетворювачі (механічний контакт, що керується зовнішнім впливом – біметалічна пластинка), вимикачі – замикання і розмикання контакту

5) **Магнітні, датчики на ефекті Холла.** Через напівпровідник, розміщений в магнітному полі, пропускають електричний струм. При цьому в поперечному напрямі до магнітного поля і струму виникає різниця потенціалів, яка пропорційна до напруженості магнітного поля (в магнітному полі розділяються електрони та дірки).

6) **П'єзоелектричні перетворювачі.** Механічна сила приводить до виникнення електричної напруги. П'єзоелектричні матеріали: природні (кварц); синтетичні (сульфат літія).

7) **Резистивні датчики.** Засновані на зміні опору певної області під дією зовнішньої дії (нагрівання, освітлення, вологість, деформація): Терморезистори. Фотопровідні перетворювачі (фоторезистори). Опромінення світлом приводить до зміни опору резистора (Se, CdS, CdTe).

8) **Термоелектричні, ВП** на основі термоелектричного ефекту.

9) **Фотоелектричні** перетворювачі (фотодіоди), засновані на явищі зовнішнього або внутрішнього фотоефекту, реагують на ІЧ, видиме, УФ, Х та  $\gamma$  випромінювання (генерується напруга). ПЗЗ – матриці

*За фізичною природою вимірюваної величини чи області використання датчиків.*

Електричні і магнітні характеристики

Параметри переміщення

Сила, момент і тиск

Температура

Рівень заповнення ємності, Витрати

Щільність, в'язкість, консистенція

Концентрація (газу, рідини, розчинених і зважених речовин)

Хімічна чи біохімічна активність

Та інші.

**ПРИКЛАДИ ПОБУДОВИ ДАТЧИКІВ**



### Термопари і температурні датчики

Датчики температури - це найбільш поширений тип датчиків. Вони застосовуються повсюдно: від інтелектуальних термостатів для холодних складів до охолоджувачів промислового обладнання, і, швидше за все, це перший сенсор, з яким ви зіштовхнетеся в IoT.

Термопара (ТС) - це пристрій для вимірювання температури, якому не потрібно джерело живлення, тому що воно саме генерує сигнал малої амплітуди (зазвичай мікрвольт). Термопара - це два провідника, виготовлені з двох різних матеріалів, з'єднані в точці вимірювання температури. На металевому електроді, в залежності від його температури, виникає електричний потенціал. У різних металів рівень цього потенціалу різний. Цей ефект відомий як електрорухомий ефект Зеєбека, його суть полягає в тому, що різниця потенціалів між двома різними металами знаходиться в нелінійної залежності від їх температури.

Величина напруги залежить від властивостей вибраного металу. Вкрай важливо, щоб кінці проводів були термічно ізольовані від системи (і дроти повинні мати однакову контрольовану температуру).

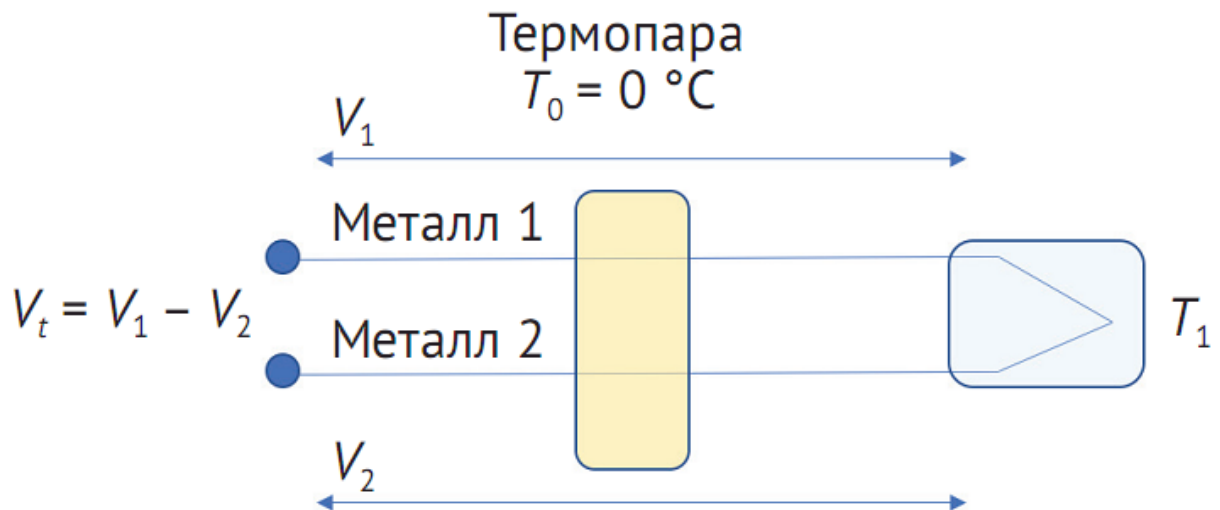


Рис. 3.1. Блок-схема вимірювання температури за допомогою термопари

Термопари слід використовувати при виконанні не дуже відповідальних вимірювань, оскільки свідчення окремих термопар, при інших рівних умовах, можуть різнитися. Це викликано тим, що різні тонкі домішки, що входять до складу вимірювальних електродів, можуть призводити до невідповідності з довідковими таблицями. Можна, звичайно, скористатися високоточними (прецизійними) термопарами, але вони і коштувати будуть, відповідно, дорожче. Іншим ефектом, що впливає на точність вимірювань, є старіння. Так як термопари часто використовуються в промислових умовах, високотемпературні середовища з плином часу можуть погіршувати точність датчиків. Тому IoT-рішення повинні враховувати зміни, що відбуваються з датчиками в процесі їх експлуатації.

Термопари добре працюють в широкому діапазоні температур. Для різних комбінацій металів прийняті колірні і буквені маркування, що вказують тип термопари (наприклад, E, M, Pt-PD). Зазвичай подібні датчики використовуються в промислових і високотемпературних середовищах при проведенні вимірювань в місцях, віддалених від оператора.

На рис. 3.2 приведена залежність ЕРС від температури для декількох типів термопар.

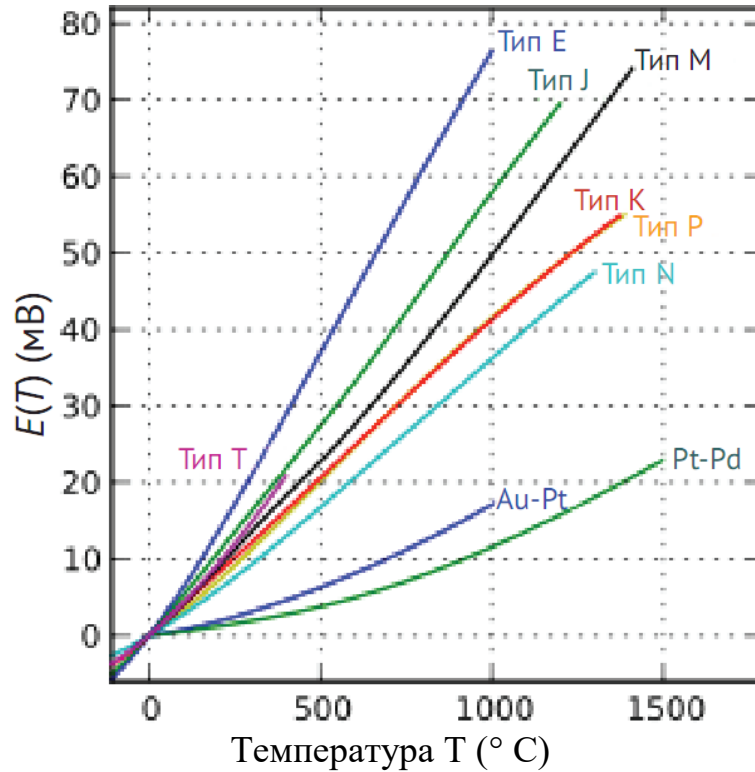


Рис. 3.2. Залежність ЕРС термопари від її температури  $E(T): T$

### Резистивні датчики температури

Резистивні датчики температури (Resistance Temperature Detectors - RTD) працюють у вузькому діапазоні температур (нижче  $600^{\circ}\text{C}$ ), але дозволяють виконувати вимірювання з більшою точністю, ніж термопари. Зазвичай вони виготовляються з дуже тонкого платинового дроту, щільно намотаного на керамічний або скляний сердечник. Електричний опір такої конструкції пропорційний її температурі. Оскільки в основі вимірів лежить вимірювання опору, для роботи з RTD необхідне зовнішнє джерело живлення з вихідною силою струму 1 мА. RTD виготовляються відповідно до прийнятих стандартів, в яких визначені допустимий діапазон і крок вимірів. Наприклад, для датчика 200 RT100 RTD крок вимірювань становить  $0,00200\ \text{Ом} / ^{\circ}\text{C}$ , а діапазон вимірювань лежить в межах від  $0$  до  $100^{\circ}\text{C}$ . В межах цього діапазону залежність опору RTD від його температури зберігає лінійний характер. У відповідності зі стандартами RTD випускаються в двох-, трьох- і чотирьох провідних виконаннях, чотирипровідні моделі використовуються виключно в системах високоточного калібрування. Для збільшення

розрізнення вимірювань RTD часто використовують в мостових схемах, при цьому зазвичай значення лінеарізуються програмно (рис. 3.3).

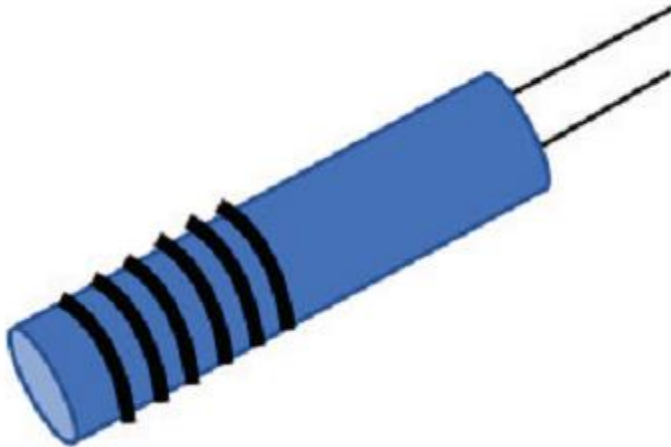


Рис. 3.3 Загальний вигляд резистивного датчика температури

Недоліки дротяних RTD:

RTD рідко використовуються в діапазоні вище  $600^{\circ}\text{C}$ , що обмежує їх застосування в промисловості. При високих температурах платина може забруднюватися, що призводить до помилкових показань, однак при вимірах в межах заданого діапазону, RTD демонструють досить точні і стабільні результати.

### Термістори

Термістор - це теж датчик температури, електричний опір якого залежить від його температури. Цей тип датчиків забезпечує більш високу точність вимірювань в порівнянні з RTD. По суті, це терморезистори, але з дуже нелінійною залежністю опору від температури. Їх часто використовують в якості згладжуючих фільтрів, для обмеження стрибків струму, а також у випадках, коли необхідна висока ступінь розрізнення вимірювань у вузькому діапазоні температур. *Існує два типи термісторів: NTC (їх опір зменшується при підвищенні температури) і PTC (їх опір зростає з підвищенням температури).* Основна відмінність від RTD полягає в тому, що термістори виготовляються з кераміки або полімерів, тоді як основою RTD завжди є метал.

Термістори знаходять застосування в медичній і науковому обладнанні, в харчовій промисловості, інкубаторах і в таких побутових приладах, як термостати.

Зведена таблиця датчиків температури

У табл. 3.1 перераховані типи датчиків температури, наведені приклади їх використання, а також вказані переваги використання конкретних датчиків.

Таблиця 3.1. Зведена таблиця датчиків температури

Категория	Термопара	Резистивные датчики температуры	Термистор
Температурный диапазон (в °C)	От -180 до 2,320	От -200 до 500	От -90 до 130
Время реакции	Быстро (микросекунды)	Медленно (секунды)	Медленно (секунды)
Размеры	Большие (~10 мм)	Небольшие (~ 5 мм)	Небольшие (~ 5 мм)
Точность	Низкая	Средняя	Очень высокая

### Ефект Холла і датчики струму

Датчик Холла - це смужка металу, через яку пропущений електричний струм. Потік заряджених частинок, що проходять через магнітне поле, відхиляється від прямолінійного напрямку. Якщо напрямком магнітного поля перпендикулярно плоскому провіднику, то на його протилежних сторонах виникатиме різниця потенціалів, обумовлена тим, що різнойменно заряджені частинки будуть збиратися на протилежних його сторонах.

Таким чином, одна сторона плоского провідника виявиться заряджена позитивно, а інша негативно, і виникне різниця потенціалів. Така різниця потенціалів називається напругою Холла, а сам ефект виникнення цієї напруги називається ефектом Холла. Це проілюстровано на рис. 3.4, наведеному нижче. Коли через металеву смугу (як показано на рис. 3.4), вміщену в магнітне поле, проходить струм, електрони притягуються до однієї її сторони, а дірки - в іншу (див. Криву на рис. 3.4).

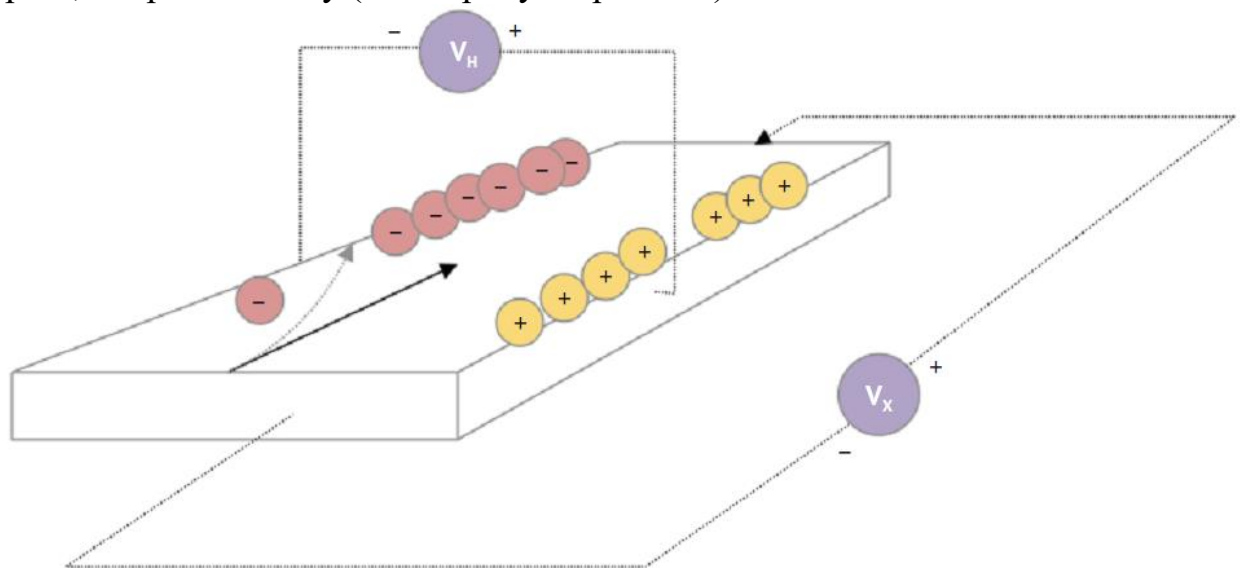


Рис. 3.4 Ілюстрація ефекту Холла

Таке розшарування породжує електричне поле, яке можна виміряти. Якщо поле досить сильне, воно нейтралізує дію магнітного поля, і носії заряду зберігають прямолінійний рух:

Ефект Холла застосовується в датчиках струму, для вимірювання змінного і постійного струму. Існує два типи таких датчиків: з розімкненим і замкнутим контуром. Датчики з замкнутим контуром дорожчі, їх часто використовують у схемах з живленням від батарей

Типова область застосування датчиків Холла: датчики положення, магнітометри, високонадійні перемикачі та показчики рівня води. Вони використовуються також в промислових датчиках для вимірювання швидкості обертання різних вузлів і механізмів. Крім того, що ці датчики недорогі у виготовленні, вони не вимогливі до умов експлуатації та можуть працювати в найсуворіших умовах.

### **Фотоелектричні датчики**

Датчики для виявлення світла або визначення його інтенсивності використовуються в багатьох пристроях IoT. Такі пристрої необхідні, наприклад, в системах безпеки, інтелектуальних комутаторах або в системах управління вуличним освітленням. Існує два типи таких датчиків, принцип дії яких зрозумілий з їх назви. Фоторезистор змінює опір в залежності від інтенсивності світла, а фотодіод перетворює світло в електричний струм.

Фоторезистори виготовляються з напівпровідників з високим опором. Їх опір зменшується при збільшенні інтенсивності освітлення. У темряві опір фоторезистора може мати досить високий опір (порядку мегаом). Фотони, що поглинаються напівпровідником, переводять електрони в зону провідності, тим самим збільшуючи провідність матеріалу. Фоторезистори чутливі до довжини хвилі падаючого світла, тому їх типів і модифікацій існує величезна безліч. А ось фотодіоди - це повноцінні напівпровідникові прилади з р-п-переходом. Такі пристрої реагують на світло, створюючи електронно-діркову пару. Потік дірок, що рухаються до анода, і електронів, що рухаються до катода, створює електричний струм. Таким чином працюють традиційні сонячні батареї, що виробляють електрику під впливом сонячних променів. Якщо на фотодіод подати зворотну напругу, то можна регулювати його чутливість або час відгуку (див. Табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Фотоелектричні датчики

Категорія	Фоторезистор	Фотодіод
Светочувствительность	Низкая	Высокая
Активный/Пассивный (полупроводниковый)	Пассивный	Активный
Чувствительность к температуре	Высокая чувствительность	Низкая
Время реакции на изменение освещенности	Длительное (от 10 мс до 1 с)	Короткое

### **Датчики PIR**

Піроелектричний інфрачервоний (Pyroelectric Infrared - PIR) датчик складається з двох слотів, заповнених матеріалом, який реагує на інфрачервоне випромінювання і тепло. Типові варіанти застосування таких датчиків - це теплові датчики руху систем безпеки. Зазвичай такі датчики оснащуються лінзою Френеля, за допомогою якої формується зона виявлення. Така зона має форму арки, що розкривається назовні. Коли тепле тіло входить або, навпаки, залишає зону виявлення, чутливі елементи формують електричний сигнал. В PIR -датчиках використовуються кристалічні матеріали, які здатні генерувати електричний струм під впливом інфрачервоного випромінювання. Все разом це утворює так званий польовий

транзистор (Field Effect Transistor - FET), який фіксує зміну струму і посилає сигнал на підсилювальний пристрій. PIR-датчики добре працюють в діапазоні хвиль від 8 до 14 мкм, цей діапазон характерний для випромінювань людського тіла.

На рис. 3.5 нижче зображені два елементи PIR, що формують дві зони виявлення. Це дозволяє не тільки відслідковувати весь простір кімнати, але і визначати напрямок переміщень.

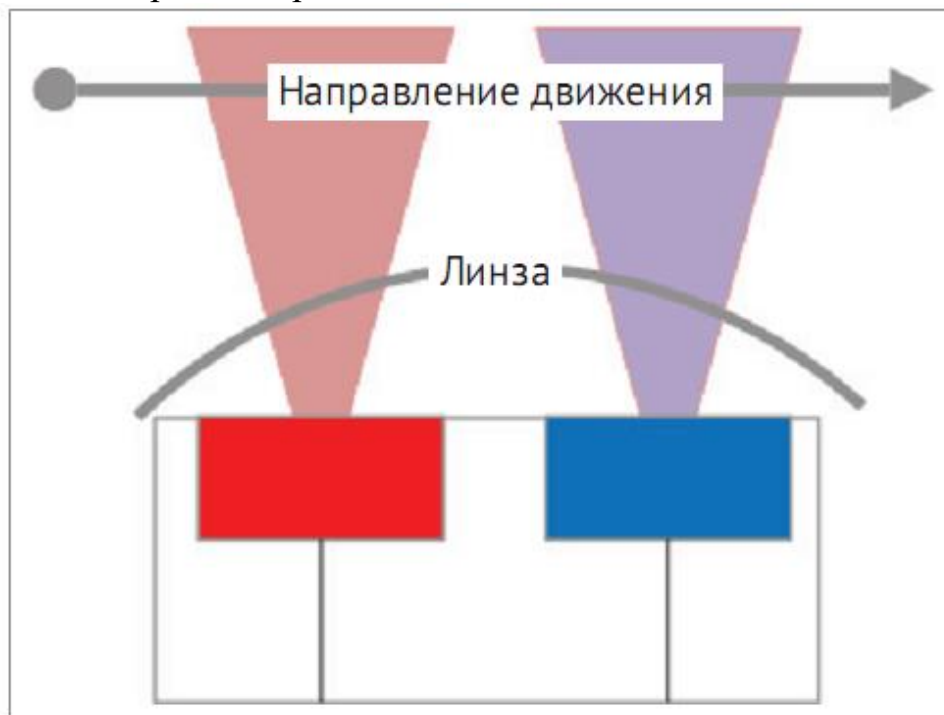


Рис. 3.5 Датчик PIR. Два елементи реагують на джерело ІК, рухомий в зоні виявлення

Для сканування більшої площі за допомогою одного датчика буде потрібно кілька лінз Френеля, які будуть фокусувати на PIR зображення окремих областей відслідковуємої території. Таке фокусування забезпечує концентрацію інфрачервоного випромінювання безпосередньо в області FET. Як правило, такі пристрої дозволяють проектувальнику контролювати чутливість (діапазон) і час реакції. Час реакції вказує, через який проміжок часу буде посланий сигнал після виявлення руху на території, що охороняється. Чим менше час реакції, тим більше подій може бути зафіксовано. На рис. 3.6 приведена діаграма типового PIR-датчика, оснащеного лінзою Френеля з фіксованою фокусною відстанню і сфокусованою на підкладку.

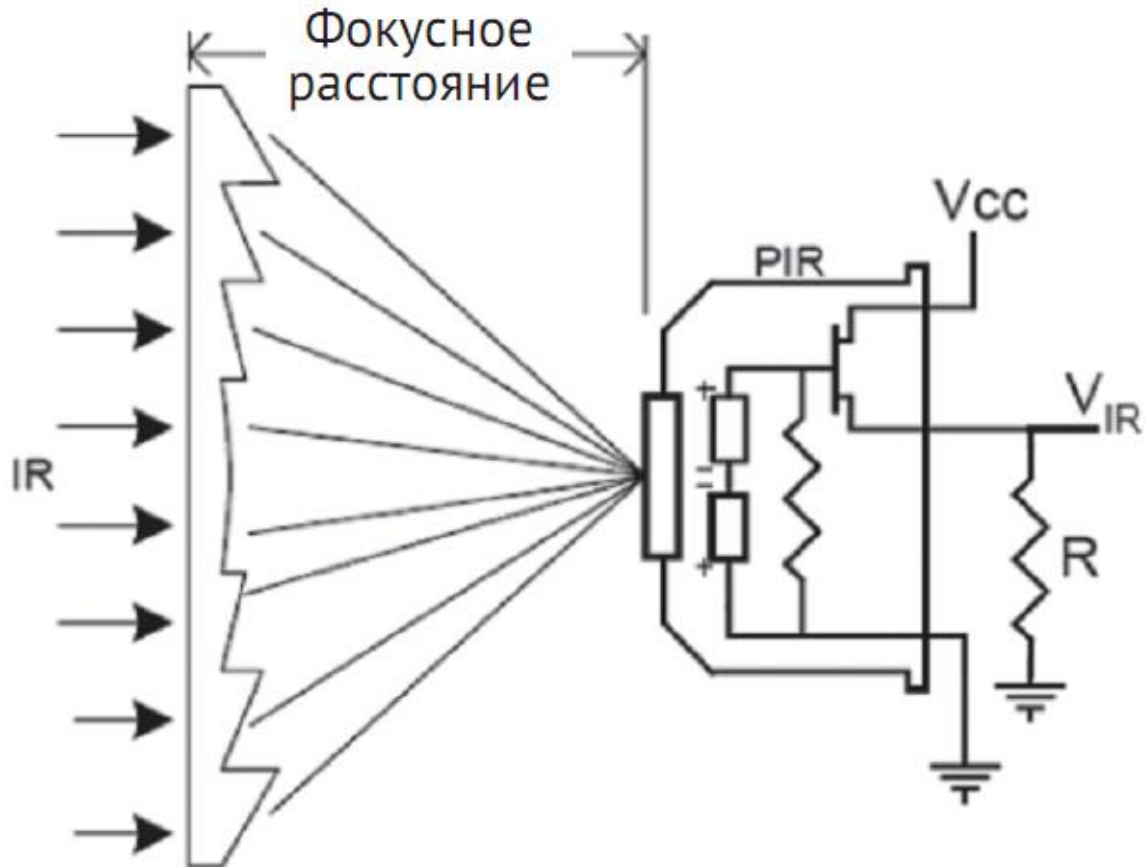


Рис. 3.6 Зліва: лінза Френеля фокусує ІЧ-випромінювання на ПІР-датчик. Схема по застосуванню Cypress Microsystems AN2105

### **LiDAR і активні датчики**

До сих пір ми розглядали пасивні датчики, які просто реагують на зміни навколишнього середовища. У цьому розділі будуть розглянуті активні датчики. Активне зондування включає в себе посилку сигналу і його аналіз після повернення. Такі датчики дозволяють судити про навколишнє середовище не тільки якісно (зафіксувати факт руху), але і кількісно (виміряти швидкість руху). Ця область досить велика, тому ми зосередимося на LiDAR-датчиках, що є основою для активних зондуючих систем.

Датчики світлового виявлення і вимірювання (Light Detecting and Ranging - лідара). Цей тип датчика вимірює відстань до цілі шляхом вимірювання відбитих від об'єкта лазерних імпульсів. Якщо датчик PIR лише виявить рух в межах свого діапазону, LiDAR здатний вимірювати кількісні характеристики цього руху. Вперше такий датчик був продемонстрований в 1960-х рр., А в даний час широко використовується в сільському господарстві, автоматизованих і самохідних транспортних засобах, робототехніці, при спостереженнях і дослідженнях навколишнього середовища. Цей тип активних вимірювальних пристроїв здатний аналізувати об'єкти будь-якого типу. Вони використовуються для аналізу газів, атмосфери, хмарних утворень і композицій, частинок, швидкості рухомих об'єктів і т.д.

LiDAR - активна сенсорна технологія, побудована на основі лазера. Коли лазерний промінь падає в об'єкт, якась його частина відбивається і повертається назад до випромінювача LiDAR. Використовувані лазери зазвичай мають довжину хвилі від 600 до 1000 нм і відносно недорогі. Їх потужність обмежена з міркувань безпеки, щоб запобігти пошкодженню очей. Деякі датчики LiDAR працюють в діапазоні 1550 нм, оскільки ця довжина хвилі не сприймається людським оком, що робить їх нешкідливими навіть при високій інтенсивності. Системи LiDAR здатні сканувати дуже великі простори і можуть працювати навіть із супутників. Така система посилає лазерні імпульси з частотою до 150 000 імпульсів в секунду і фіксує їх відображення масивом фотодіодів. Іноді проходження посилаються і відображених лазерних імпульсів регулюється системою обертових дзеркал, що формує тривимірне зображення навколишнього середовища. Для кожного переданого променевого імпульсу фіксується кут відображення, вимірюється час прольоту (Time of Flight - TOF) і місце розташування GPS. Ці параметри дозволяють отримати повне уявлення про досліджуваному просторі.

Рівняння для розрахунку відстані до спостережуваного об'єкта відносно просте:

$$\text{Расстояние} = \frac{(\text{Скорость пролета} \times \text{Время пролета})}{2}$$

Інші активні датчики працюють за тим же принципом, що і LiDAR. Кожен з них посилає будь-який сигнал, який, відбиваючись, повертається до датчика, що і створює зображення сцени, що спостерігається, або вказує на те, що сталося якась подія. Ці датчики набагато складніші, ніж прості пасивні датчики, споживають більше енергії, коштують дорожче і вимагають більшого простору (рис. 3.7).

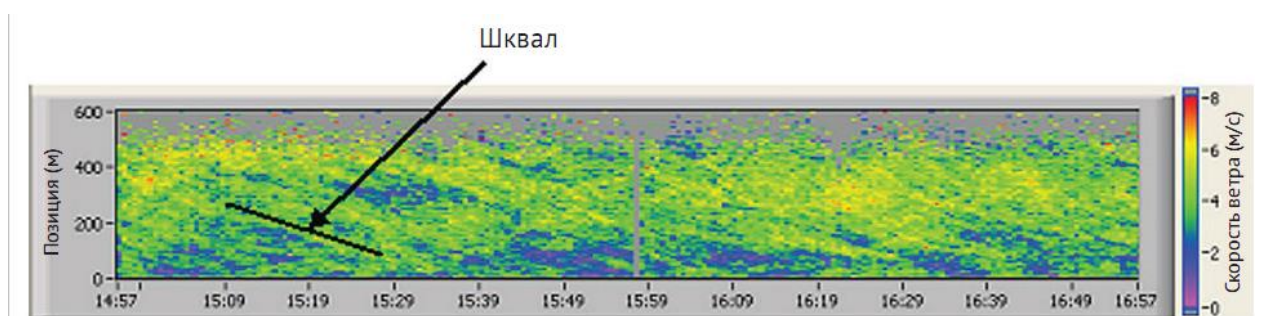


Рис. 3.7 LiDAR: приклад зображення, отриманого за допомогою LiDAR.

Такі картинки використовуюваного для аналізу атмосферних поривів вітру, для забезпечення захисту вітрових турбін. Зображення надано NASA

#### 4. Технологія MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)



На сьогоднішній день однією з інноваційних технологій у розвитку датчиків є технологія мікроелектромеханічних систем - MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems).

**Визначення:** Під технологією MEMS розуміють технологію мікрообробки, що дозволяє виготовляти кремнієві мікросхеми з крихітними механічними елементами – інтелектуальними машинами з самими різними функціями. Відповідно MEMS – це об'єднання механічних елементів, датчиків, приводів і електроніки на одній кремнієвій пластині (підкладці).

Світовий ринок MEMS є дуже динамічним і згідно останнім прогнозам росте на 13,2% щороку. До речі, цю галузь індустрії в Японії називають мікромашинами (Micromachines), а в Європі - мікросистемними технологіями (Micro System Technology).

Фундаментальні і пошукові дослідження, що проводяться в США, Японії, країнах Європи і Південно-східної Азії, успішно поєднуються з розробками і виробництвом MEMS і об'єктів озброєння і військової техніки на їх основі. При цьому одночасно вирішуються питання уніфікації, стандартизації виробів MEMS для ефективного використання в апаратурі нового покоління, що розробляється.

Всі елементи мікроелектромеханічних систем можуть бути реалізовані у вигляді єдиного виробу, причому відразу десятками або сотнями, як мікросхеми на кремнієвій пластині, в основі цього лежить апробована традиційна технологія виробництва напівпровідникових інтегральних мікросхем.

Багато експертів, включаючи фахівців однієї з провідних фірм в цій області - Integrated Sensing Systems (<http://www.mems-issys.com>), - вважають, що MEMS-технологія привносить буквально революційні зміни в кожен сферу застосування шляхом поєднання мікроелектроніки на основі кремнію з мікромеханічною технологією, що дозволяє реалізувати систему на одному кристалі SOC (Systems-on-a-Chip). Так, технологія MEMS дала новий імпульс розвитку систем інерціальної навігації і інтегрованих систем, відкривши шлях до розробки "розумних" виробів, збільшивши обчислювальні здібності мікродатчиків і розширивши можливості дизайну таких систем.

Сьогодні MEMS-пристрої застосовуються практично всюди. Це можуть бути мініатюрні деталі (гідравлічні і пневмоклапани, струменеві сопла принтера, пружини для підвіски головки вінчестера), мікроінструменти (скальпелі і пінцети для роботи з об'єктами мікронних розмірів), мікромашини (мотори, насоси, турбіни величиною з горошину), мікророботи, мікродатчики і виконавчі пристрої, аналітичні мікролабораторії (на одному кристалі) і так далі

Взагалі кажучи, мікросистема припускає інтеграцію ряду різних технологій (MEMS, КМОП, оптичну, гідравлічну і т. д.) в одному модулі [8]. Наприклад, технології виготовлення MEMS-пристроїв для НдВЧ-застосувань (котушки індуктивності, варактори, комутатори, резонатори) мають на увазі традиційні технологічні цикли виготовлення інтегральних схем, адаптовані

для створення тривимірних механічних структур (це, наприклад, об'ємна мікрообробка, поверхнева мікрообробка і так звана технологія LIGA).

Кремнієва об'ємна мікрообробка включає технологію того, що глибинного об'ємного травлення. При такому процесі об'ємна структура виходить усередині підкладки завдяки її анізотропним властивостям, тобто різній швидкості травлення кристала залежно від напрямку кристалографічних осей. Об'ємну структуру можна отримати і методом нарощування, коли декілька підкладок сплаваються і утворюють вертикальні зв'язки на атомарному рівні.

При поверхневій мікромеханічній обробці тривимірна структура утворюється за рахунок послідовного накладення основних тонких плівок і видалення допоміжних шарів відповідно до необхідної топології. Перевага даної технології - можливість багатократного видалення (розчинення) допоміжних шарів без пошкодження взаємозв'язків базових шарів. А головна її особливість полягає в тому, що вона сумісна з напівпровідниковою технологією, оскільки для мікрообробки використовується звичайна КМОП-технологія [8].

Назва технології LIGA походить від німецької аббревіатури Roentgen Lithography Galvanik Abformung, що означає комбінацію рентгенівської літографії, гальванотехніки і пресування (формування). Тут товстий фоторезистивний шар піддається дії рентгенівських променів (засвіченню) з подальшим гальванічним осадженням високопрофільних тривимірних структур. Суть процесу полягає у використанні рентгенівського випромінювання від синхротрона для отримання глибоких, з прямовисними стінками топологічних картин в полімерному матеріалі. Випромінювання синхротрона має надмалий кут розходження пучка. Джерелом випромінювання служать високоенергетичні електрони, що рухаються з релятивістськими швидкостями. Глибина проникнення випромінювання досягає декількох міліметрів. Це обумовлює високу ефективність експонування при малих часових витратах. Вважається, що дана технологія забезпечує якнайкраще відношення відтвореної ширини каналу до його довжини (при мінімальних розмірах).

Найважливіша складова частина більшості MEMS - **мікроактуатор**. Зазвичай даний пристрій перетворює енергію в керований рух. Розміри мікроактуаторів можуть досить сильно варіюватися. Діапазон застосування цих пристроїв надзвичайно широкий і при цьому постійно росте. Всі методи активації (рух, деформація, приведення в дію) в таких пристроях коротко можна звести до наступних: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний і тепловий. При оцінці використання того або іншого методу часто застосовують закони пропорційного зменшення розмірів. Найбільш перспективними методами вважаються п'єзоелектричний і гідравлічний, хоча і інші мають велике значення. Електростатична активація застосовується приблизно в одній третині мікроактуаторів, і це, ймовірно, найбільш загальний і добре розроблений метод; головні його недоліки - знос і злипання. Магнітні мікроактуатори зазвичай вимагають великого

електричного струму на мікроскопічному рівні. При використанні електростатичних методів активації отримуваний вихідний сигнал на відносну одиницю розмірності кращий, ніж при використанні магнітних методів. Іншими словами, при одному і тому ж розмірі електростатичний пристрій видає декілька кращий вихідний сигнал. Теплові мікроактуатори теж споживають відносно багато електричної енергії; головний їх недолік полягає в тому, що тепло, що генерується, доводиться розсіювати.

Для оцінки мікроактуаторів використовують такі критерії якості, як лінійність, точність, погрішність, повторюваність, розрізнення, гістерезис, порогове значення, люфт, шум, зрушення, що несе здатність, амплітуда, чутливість, швидкість, перехідна характеристика, масштабованість, вихід по енергії [8].

## **ВИСНОВКИ**

Таким чином, в IoT датчики є джерелом даних і від їх вибору залежить виконання задачі в цілому.

При виборі датчиків слід враховувати їх точність та відповідність умовам експлуатації системи IoT.