

## Тема 9. Інтелектуальні акустичні сенсори. Електричні сенсори

### Фізичні основи роботи акустичних сенсорів

У акустичних сенсорах первинні інформаційні сигнали є акустичними. Це, наприклад, звуки живої мови, музика, спів птахів, сигнали ехолокації дельфінів або акустичні сигнали в ультразвуковій діагностиці, поверхневі акустичні хвилі і тому подібне.

Акустичні хвилі - це коливання тиску, що поширюються в повітрі (газах), рідині або в твердому середовищі. Відомо, що акустичні хвилі поширюються значно повільніше, ніж радіохвилі: в повітрі, наприклад, зі швидкістю близько 340 м/с, у воді - близько 1,5 км/з, в твердих тілах - 3-6 км/с. І це має свої позитивні сторони.

По частоті коливань акустичні хвилі підрозділяють на:

- інфразвуки (частота менше 16 Гц);
- звуки (діапазон частот від 16 Гц до 20 кГц), які сприймає людське вухо;
- ультразвуки (від 20 кГц до 1 ГГц);
- гіперзвуки (понад 1 ГГц, аж до 10<sup>13</sup> Гц).

Інфразвуки у воді можуть поширюватися на сотні кілометрів. Сприймаючи їх, мешканці моря заздалегідь "чують" наближення шторму. Гіперзвуки і ультразвуки сильно розсіюються, поглинаються і тому затухають набагато швидше.

Ультразвукові хвилі по частоті зазвичай ділять на три діапазони:

- низькочастотний (16-100 кГц, довжина хвилі в повітрі 3-20 мм, у воді 15-90 мм);
- середніх частот (0,1-10 МГц, довжина хвилі в повітрі 0,034-3,4 мм, у воді 0,15-15 мм);
- високочастотний (10-1000 МГц, довжина хвилі в повітрі 0,34-34 мкм, у воді 1,5-150 мкм).

Акустичні хвилі природного походження, як правило, є складними, несуть з собою коливання різних частот. Їх частотний склад зазвичай характеризують

частотно-амплітудним спектром - залежністю інтенсивності або амплітуди коливань від частоти.

Музичні звуки мають в основному дискретний спектр, інші - безперервний спектр.

Звукові шуми мають дуже широкий безперервний спектр частот.

Інтенсивність акустичних, як і усіх інших видів хвиль характеризують середньою енергією, переносимою ними за одиницю часу через одиницю площі, перпендикулярної до напрямку поширення, і вимірюють у Вт/м<sup>2</sup>.

Специфічною характеристикою інтенсивності акустичних хвиль є амплітуда коливань тиску (Па). У області звуків, які чує людина, використовують і логарифмічну міру гучності звуку - так званий "рівень звукового тиску". Його виражають в децибелах (дБ) і обчислюють за формулою

$$N=20 \lg(p/p_0).$$

де  $p$  - амплітуда коливань тиску в паскалях, а  $p_0$  - це так званий "порог чутності", тобто мінімальна амплітуда звукових коливань, які здатне почути людське вухо.

Оскільки акустичні хвилі - це коливання тиску, то для сприйняття їх застосовують елементи, чутливі до швидких коливань зовнішнього тиску.

Як правило, це легкі мембрани або діафрагми, що перетворюють коливання тиску повітря, рідини або твердого тіла в механічні коливання, які, у свою чергу, перетворюються далі на електричні сигнали або в сигнали іншої природи.

Датчики, чутливі до звукових хвиль, що поширюються в повітрі або в газах, зазвичай називають мікрофонами; датчики, чутливі до акустичних хвиль, які поширюються у воді або в рідинах, - гідрофонами; а датчики акустичних хвиль в твердих тілах, - стетоскопами. Лікарі, наприклад, вже багато століть застосовують механічні стетоскопи для прослуховування звуків усередині грудної клітки людини, скорочень серця, що виникають в результаті, проходження повітря по дихальних шляхах і т.д.

Основними параметрами акустичних датчиків є: частотний і динамічний діапазони, чутливість, діаграма направленості і амплітудно-частотна характеристика (АЧХ).

## Мікрофони

Перші мікрофони були резистивними. Для перетворення механічних коливань в електричний сигнал в них використали вугільний (графітовий) порошок, електричний опір якого зменшувався із зростанням тиску. Потім набір принципів роботи акустичних датчиків значно розширився. Нині використовуються: електростатичні (конденсаторні, ємнісні), волоконно-оптичні, п'єзоелектричні, п'єзорезистивні, електретні і інші типи таких датчиків.

Електретні мікрофони відрізняються тим, що для них не потрібне зовнішнє джерело напруги, оскільки джерелом електричного поля в них є електрет - матеріал з постійною (іноді говорять "замороженій") електричною поляризацією.

Промисловість випускає зараз багато типів високоякісних мікрофонів. Для прикладу на рис. 9.1 показані деякі мікрофони компанії Sanken.



Рисунок 9.1 – Мікрофони компанії Sanken

Ліворуч - конденсаторний мікрофон CS - 1 масою 100 г і завдовжки 180 мм. Завдяки відповідній конструкції приймальної трубки (чутлива мембрана глибоко втоплена, а пластинчата м'яка бічна поверхня трубки глушить звукові коливання, що поступають збоку) цей мікрофон має вузьку діаграму спрямованості в діапазоні частот від 50 Гц до 100 кГц, майже плоску амплітудно-частотну характеристику, високу чутливість (- 30 дБ/Па). Він не спотворює звук, навіть

якщо встановити його поряд з джерелом, відмінно працює аж до гучності звуку в 137 дБ. Його використовують у тому числі і для професійного звукозапису найвищої якості.

Нове "дихання" удосконаленню мікрофонів дало застосування мікросистемних технологій. Разом з чутливим до звуку датчиком з'явилася можливість сформуванню в тому ж кристалі кремнію і усі електронні схеми, потрібні для посилення, селекції і обробки звукових сигналів. Це привело до зменшення на порядок розмірів, маси і вартості мікрофонів, що дуже важливо для усіх портативних пристроїв. Різко покращали чутливість і інші характеристики мікрофонів, зменшився вплив зовнішніх перешкод і шумів. "MEMS мікрофони", як їх стали називати, вже знайшли широке застосування в портативних відеокамерах, в мобільних телефонах, відеотелефонах.

Фирма Akustica Inc. почала промисловий випуск першою у світі акустичної системи на КМОП кристалі розміром 3,65x3x0,5 мм, виконуючій функції багатьох мікрофонів, електронних блоків і програмного забезпечення. Система перекриває частотний діапазон від 100 Гц до 10 кГц, має чутливість - 40 дБ, споживану потужність - лише 0,4 мВт.

## **Стетоскопи**

У стетоскопах акустичні коливання зовнішньої грані твердого тіла перетворюють у відповідні коливання тиску газу або рідини. Вони по звукопровідній трубці передаються на чутливий до акустичних коливань елемент. З метою підвищення чутливості площу контакту стетоскопа з твердим тілом збільшують, а стінки звукопровідної трубки поступово звужують, щоб сконцентрувати акустичні коливання тиску на невеликій площі і збільшити їх амплітуду. Звуження, як правило, робиться за експоненціальним законом.

Тривалий час чутливим елементом стетоскопа було тільки вухо людини. Промисловість продовжує випускати такі стетоскопи і зараз - вже не лише для медичних і ветеринарних, але і для технічних застосувань. Фірма Draper, наприклад, випускає стетоскоп D54503, призначений для виявлення (по змінах

звукової "картини") дефектів в двигунах, підшипниках і в інших рухливих деталях працюючих машин (<http://www.voltra.ru>).

Зараз в стетоскопах застосовують вже і "штучне вухо". На рис. 9.2 ліворуч показаний медичний електронний стетоскоп CADIScore фірми CADITEC (Швейцарія), який сам через грудну клітку людини сприймає звуки роботи серця, посилює їх і відтворює у вигляді осцилограми на рідкокристалічному дисплеї разом з шкалою і відмітками часу. Таким чином можна виявити і наочно побачити ознаки навіть нечутних вухом хрипів в дихальних шляхах, серцевих аритмій і тахікардії.

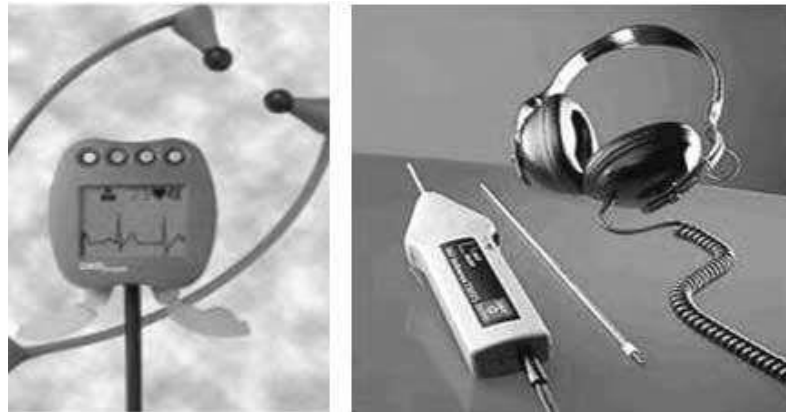


Рисунок 9.2 – Стетоскопи

У разі потреби фонограму роботи дихальних шляхів і серця можна передати на комп'ютер і задокументувати. З комп'ютера її можна передати також на великі відстані через Інтернет і отримати термінову консультацію найдосвідченіших фахівців. На цей же дисплей можна вивести також синхронну електрокардіограму, отриману від електрокардіографа. Це робить електронний стетоскоп дуже цінним медичним інструментом для діагностики захворювань серця.

З використанням вищеописаних приймачів акустичних сигналів будують інтелектуальні акустичні сенсори, у тому числі такі, в яких за допомогою мікропроцесора виконується професійна обробка первинних сигналів і забезпечується зручний сервіс.

## **Диктофони**

Одним з видів таких сенсорів є сучасні диктофони. Ще декілька десятиліть тому акустичні сигнали, які сприймалися мікрофоном, посилювалися і записувалися на магнітну стрічку в магнітофонах. Сучасні диктофони вже не мають рухливих вузлів, і тому їх можна застосовувати в дорозі, в умовах вібрацій, запиленої, в значно ширшому діапазоні температур довкілля. Наявність вбудованого мікропроцесора і програмного забезпечення дозволяє в реальному часі фільтрувати, обробляти, формувати музику, живу мову і інші звукові послідовності в стандартні звукові файли, організувати зручні для користувача каталоги цих файлів, інтерфейс із зовнішнім комп'ютером або мережею зв'язку.

Використовуючи флеш-пам'ять, можна записувати і зберігати дуже великі об'єми звукових файлів.

Цифровий диктофон SM розрахований на запис звуку на зовнішню флеш-пам'ять не лише зі вбудованого в нього мікрофону, але і з телефонної лінії. Запису у вигляді стандартних звукових файлів (в цілому до 1120 хвилин живої мови) можна прослуховувати за допомогою навушника, переносити на комп'ютер. В ході запису диктофон сам автоматично видаляє довгі паузи в мові, що дозволяє ефективно використати пам'ять. Маса цього диктофона тільки 17 г, габаритні розміри 51 x 42 x 11 мм. Літій-полімерні акумулятори забезпечують 55 годин автономної роботи в режимі запису і до 2,5 місяців роботи в режимі очікування.

Портативний цифровий диктофон Olympus VN - 1100 легкий, зручний, має типовий дизайн, дружнє до користувача меню. Забезпечує можливість запису до 17 годин розмови. Записи автоматично датуються і можуть зберігати позначки користувача, легко переносяться в комп'ютер. Можуть відтворюватися, починаючи з будь-якого місця.

## **Портативні звукоаналізатори**

Відколи людство зрозуміло позитивну роль мелодійних звуків і негативний вплив на наше здоров'я шумів і дратівливих надмірно гучних звуків,

з'явилася і почала зростати потреба в їх акустичних вимірах. Потреба ця стала особливо актуальною, коли в технічно розвинених країнах світу були ухвалені закони, регулюючі допустимі рівні промислових і побутових шумів. Ще до недавнього часу для вимірів гучності звуку, часу реверберації звуків в приміщеннях, для виявлення і визначення резонансних частот і інших важливих акустичних характеристик приміщень використовувалася складна стаціонарна апаратура. Але зростаюча потреба у вимірах привела до створення відносно недорогих портативних вимірників гучності звуку і інших параметрів звукових коливань.

Портативний аналізатор звуку 2250 фірм Bruel & Kjaer є двоканальним. Схема його застосування показана на рис. 9.3 б. До входу приєднуються приймачі звуку зі вбудованим передпідсилювачем.

З'єднання може бути як безпосереднім, так і через спеціальний кабель завдовжки в десятки метрів. Аналізатор вийшов дуже зручним і різнобічним помічником для фахівців з акустики. Залежно від закладеного в його мікрокомп'ютер програмного забезпечення, він може використовуватися: як вимірника інтенсивності або гучності звуку; як реєстратор середнього рівня шуму на вулицях міста, в районах аеропортів, на промислових підприємствах в різних частотних діапазонах; для дослідження акустичних властивостей приміщень, концертних залів; для точного налаштування музичних інструментів, для контролю їх якості, пошуку шляхів їх поліпшення.

Аналізатор може швидко розкласти звукові коливання в спектр, який виводить на свій рідкокристалічний дисплей. При цьому він може працювати як з тривалими, так і з короткочасними звуками, а також з механічними вібраціями, записуючи їх у свою пам'ять. З його допомогою можна по зміні характеру звуку оперативно виявити збої і порушення в роботі двигунів, машин, швидко знаходити причини неполадок.

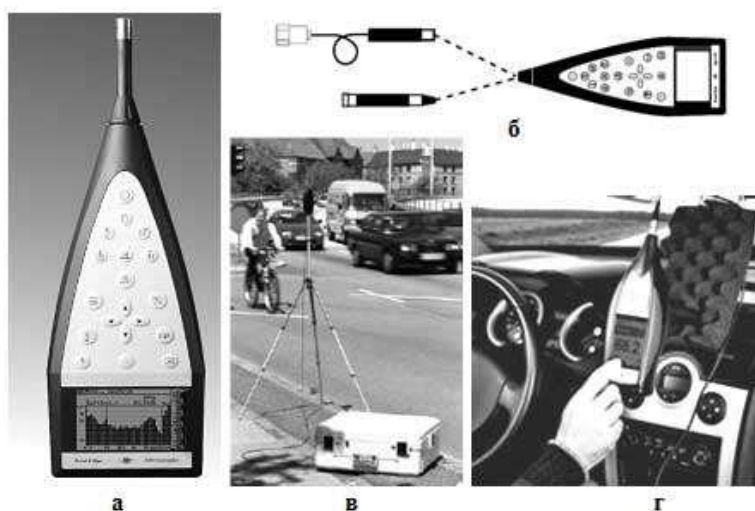


Рисунок 9.3 – Портативний аналізатор звуку сімейства 2250 фірми Brüel & Kjær

На рис. 9.3 в показано застосування аналізатора звуку для оперативного контролю шумів на вулицях і площах міста, а на рис. 6.30 г - для мобільних вимірів рівня шумів і створення шумової карти міста, околиць аеропорту, місцевості, що оточує занадто "шумні" підприємства. В цьому випадку мікрофони встановлюють на даху автомобіля, на якому об'їжджають контрольовану місцевість, фіксуючи в пам'яті приладу виміряні рівні шуму, що відповідає координати і час. Якщо в автомобілі є GSM навігатор, то результати вимірів рівня шуму автоматично прив'язуються до карти. Виміряний рівень шуму може автоматично порівнюватися з допустимим рівнем. При перевищенні рівня шуму подається сигнал, і мікропроцесор сам складає відповідний протокол.

Все більше власників мобільних телефонів починають користуватися так званою "Bluetooth гарнітурою". Ці невеликі легені акустичні сенсори кріплять до вуха з метою вивільнення рук від необхідності тримати мобільний телефон, яким можна тепер дистанційно користуватися на відстані до 10-20 м. З цією метою в гарнітуру вбудовуються мініатюрний мікрофон, схеми посилення сигналів від нього, Bluetooth радіоприймач- передавач, навушник і необхідні елементи управління. Деякі зразки з широкого вибору наявних на ринку гарнітур Bluetooth показані на рис. 9.4. Цілий ряд гарнітур підтримує сервіс видачі команд, що



управляють, голосом, голосовий набір номера, а через деякі з них за допомогою голосу можна навіть управляти декількома домашніми пристроями, оснащеними інтерфейсом Bluetooth. Це може бути, наприклад, кондиціонер або обігрівач, радіоприймач або телевізор.



Рисунок 9.4 – Безпроводова гарнітура

### Підслуховуючі пристрої

Серед інтелектуальних акустичних сенсорів є і прилади для непомітного прослуховування розмов. Відразу ж обумовимо, що це є законним лише за наявності дозволу суду або прокурора. Одним з видів таких сенсорів є спрямовані приймачі звуку (рис. 9.5) з рупорною 1 або з параболічною антеною 2.

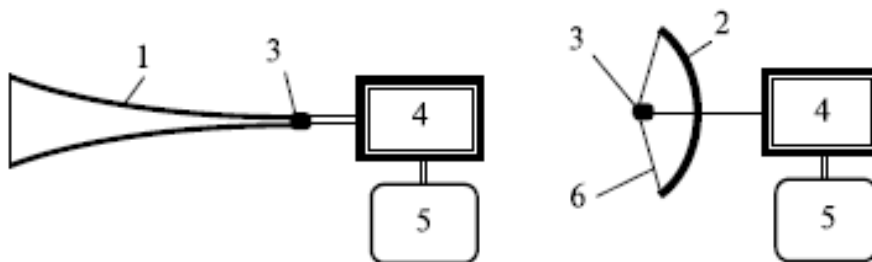


Рисунок 9.5 – Функціональна схема спрямованих приймачів звуку :  
ліворуч - з рупорною 1; справа - з параболічною антеною 2; 3 - мікрофон; 4 -  
електронний блок; 5 - навушники або гучномовець; 6 - розтяжки для кріплення  
мікрофону

Така антена не лише забезпечує гостру спрямованість і фільтрацію звуків, що приходять з інших напрямів, але і, збираючи звук з великої поверхні, концентрує його на малій площі мікрофону 3, чим забезпечує підвищення чутливості. У електронному блоці 4 робляться фільтрація, посилення і попередня обробка сигналів. Посилені звукові сигнали можна прослуховувати через навушники або гучномовець. Паралельно робиться запис розмови в пам'ять сенсора.

З параболічною антеною діаметром 0,4-1 м вдається досягти гостроти діаграми спрямованості і чутливості, достатніх для того, щоб за відсутності значного стороннього акустичного шуму почути і зафіксувати розмову, що ведеться на відстанях до 1200 м. У реальних умовах міста за наявності значного звукового фону ця дистанція скорочується до 100 м. Якщо розмова ведеться усередині приміщення або автомобіля за закритими вікнами, то для його прослуховування розроблені так звані «лазерні мікрофони».

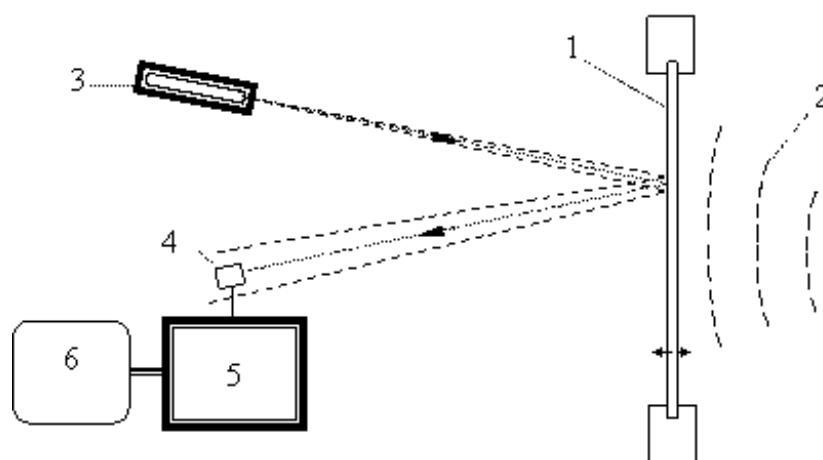


Рисунок 9.6 – Функціональна схема лазерного мікрофона

Звукові хвилі 2, досягаючи скла 1, викликають його вібрацію з відповідними звуковими частотами. Тут скляна пластина вікна грає роль мембрани - чутливого елементу сенсора, який перетворює звукові сигнали на механічні коливання. На значній відстані від скла (до 100-200 м) встановлюють лазер 3, невидимий (як правило, інфрачервоний) модульований промінь якого направляють на скло. На такій же приблизно відстані в межах конуса відбитого

від скла лазерного променя розташовують приймальний пункт, до складу якого входять один або декілька фотоприймачів 4, електронний блок 5 і генератор звуку 6 (навушники або гучномовець). При вібраціях скла змінюється фаза світлових коливань, що потрапляють на фоточутливий елемент в точці прийому.

Сигнали від нього в електронному блоці посилюються, фільтруються, детектуються і записуються, а також можуть бути прослухані через навушники 6.

Можливо для прослуховування використовувати пристрої із застосуванням стетоскопа. Мініатюрний стетоскоп кріплять до стіни приміщення, що примикає до того, що охороняється, - до бетонної панелі стелі, пола або до стіни тієї ділянки системи вентиляції, яка підходить до приміщення, що прослуховується. Чутливість сучасних стетоскопів дозволяє прослуховувати розмову за бетонною стіною завтовшки до 1 м. Сигнал від стетоскопа передається на електронний блок, який його посилює, обробляє і через кабель посиляє до передавача.

Раніше це були радіопередавачі на ультракоротких хвилях. Тепер частіше застосовують оптичні інфрачервоні передавачі з великою кутовою апертурою випромінювання. Це дозволяє встановити приймач у будь-якому зручному місці досить широкої зони, оскільки радіус прийому складає 500 м і більше. Передачу інфрачервоними променями виявити значно важче, ніж радіопередачу. Тим паче, що наявний в електронному блоці мікропроцесор дозволяє розбити розмову на фрагменти, стиснути існуючу.

### **Гідролокатори**

Ще активнішими акустичними сенсорами є ехолокатори, які самі генерують акустичні хвилі для того, щоб зібрати потрібну інформацію про контрольовані об'єкти. У цьому вони подібні до радіолокаторів, але зондування довкілля ведеться не радіохвилями, а акустичними хвилями. Оскільки акустичні хвилі поширюються значно повільніше, ніж радіохвилі, той час запізнювання

відбитих сигналів значно більше, що істотно спрощує обробку сигналів при зондуванні на невеликі відстані.

Перевагу в ехолокації зазвичай віддають ультразвуковим (далі УЗ) хвилям, оскільки вони:

- мають меншу довжину хвилі і тому більш високу роздільну здатність;
- при тій же амплітуді коливань тиску мають значно більш високу інтенсивність (яка пропорційна квадрату частоти);
- не сприймаються людським вухом, тому не створюють для нас небажаний звуковий фон.

УЗ хвилі середніх і високих частот досить сильно поглинаються і швидко затухають в повітрі і газах. Тому для ехолокації в повітрі застосовують переважно низькочастотні УЗ хвилі.

Ехолокацію у водній і взагалі в рідкому середовищі прийнято називати гідролокацією. Перші гідролокаційні прилади вимірювали тільки глибину водойми, тобто відстань від акустичної антени до дна моря (океану, річки, озера). Саме такі прилади спочатку і називали ехолотами. Якщо судно з ехолотом переміщалося, то на основі таких вимірів будувався профіль дна відносно поверхні води уздовж траєкторії переміщення судна.

Нині поняття "ехолот" значно розширилося. Ехолотами називають усі сенсори, які діють за принципом сприйняття звуків, відбитих від розташованих віддалік предметів, тобто за принципом луни (від грецького "луна" - відбитий звук, відгомін, відгук). У гідролокації назви "гідролокатор" і "ехолокатор", "ехолот", "сонар" (аббревіатура від англійської назви "SOund NAvigation and Ranging", приблизний переклад - звукова навігація і вимір відстаней) стали практично синонімами.

Акустична антена 1, герметично захищена оболонкою 2, зробленою з прозорого для звуку матеріалу, знаходиться у воді. Через кабель вона сполучена з комутатором 3, який по черзі підключає до неї генератор 4 або приймач-підсилювач акустичних сигналів 5. Останній сполучений з селектором сигналів 6, вихід якого підключений до мікропроцесора 7. Виходи останнього підключені

до індикатора 8 і до інтерфейсного блоку 9. Роботою гідролокатора автоматично управляє мікропроцесор 7. Він подає на генератор 4 сигнал про початок зондування водного простору і команди про параметри цього зондування (частота ультразвуку, тривалість, структура і потужність УЗ імпульсів, періодичність їх повторення і тому подібне). Потім мікропроцесор 7 подає сигнал на комутатор 3, який пропускає електричні коливання від генератора 4 до антени 1. Там вони за допомогою п'єзоелектричного осцилятора перетворюються на потужні акустичні коливання і випромінюються антеною в навколишній водний простір.

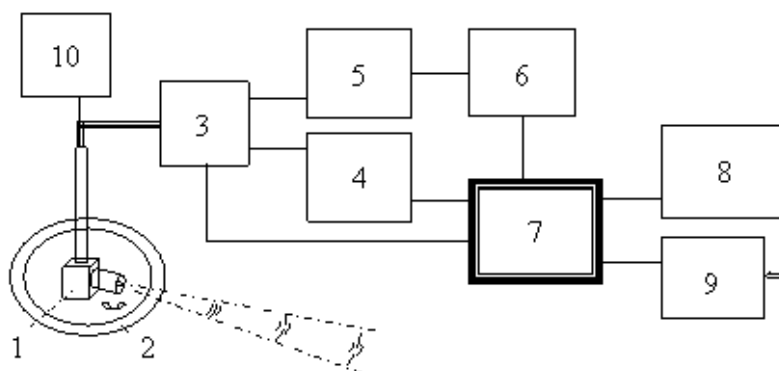


Рисунок 9.7 – Принцип роботи гідролокатора



Рисунок 9.8 Базовий блок гідролокатора Furuno SH - 250, який випускається для застосування на рибпромисловому флоті.

Акустична антена кругового і вертикального сканування встановлюється на підводній частині корпусу корабля.

Гідролокатор може працювати у восьми режимах:

- відображення ехо-профілю пройденого маршруту;
- точне визначення координат об'єктів. - секторне або кругове сканування водного простору по азимуту;
- вертикальне сканування;
- комбінація секторного і вертикального сканування для оцінки розподілу косяка одночасно в горизонтальній і вертикальній площинах;
- прокладення маршруту з уважним обстеженням усіх можливих підводних перешкод;
- забезпечення гідролокаційного "захоплення" вказаного оператором об'єкту (косяка, підводної перешкоди) і автоматичне стеження за ним пучком УЗ хвиль.

### **Інтелектуальні сенсори**

Існує багато простіших інтелектуальних сенсорів, в яких використовується активна гідролокація. Один з них - вимірник потоку рідини Sonartron ST фірми Honsberg показаний на рис. 9.9.



Рисунок 9.9 – УЗ вимірнювач потоку рідини Sonartron ST фірми Honsberg

У проточну металеву трубу, крізь яку пропускається рідина, один проти одного вбудовані випромінювач і приймач УЗ імпульсів. Ці імпульси проходять уздовж осі потоку. Час запізнювання прийнятого імпульсу відносно моменту випромінювання залежить від швидкості руху рідини. Електронна схема, яка вимірює час запізнювання, перераховує цей час за даними попереднього калібрування у величину потоку рідини і видає це значення в цифровій формі. Потік води в діапазоні від 0,04 л/хв. до 40 л/хв. вимірюється з точністю до 2,5 %. Сенсор має також аналоговий електричний вихід і захисне електричне реле, що замикається при перевищенні потоком рідини заздалегідь заданої в цифровому виді величини.

### **Інтелектуальні акустичні сенсори для УЗВ**

Одним із застосувань ехолокації вже не у воді, а в повітрі, являється УЗ виявлення присутності об'єкту в контрольованій зоні і вимір відстані до нього. Особливо важливим стає це в складних умовах густого туману, задимленості, запиленій і тому подібне, коли оптичні методи "працюють" погано. А для УЗ хвиль це усе - не перешкода. В якості джерела ультразвуку найчастіше застосовують п'єзоелектричні перетворювачі. Деякі типи УЗ сенсорів відстані, що промислово випускаються, показані на рис. 9.10.



Рисунок 9.10 – УЗ сенсорів відстані, що промислово випускаються

Випромінювач і приймач УЗ хвиль знаходяться в одному корпусі разом з необхідною для вимірів електронікою і з елементами, що забезпечують спрямованість - концентрацію випромінюваних УЗ хвиль, що приймаються, в певному секторі простору. УЗ хвилі з частотою 65-400 кГц у вигляді короткочасного імпульсу випромінюються у напрямі контрольованої зони 10-200 разів кожену секунду. Якщо в контрольованій зоні з'являється об'єкт, то відбита або розсіяна від нього УЗ хвиля повертається назад до сенсора і сприймається приймачем з деяким запізненням. По вимірному часу запізнення розраховується відстань до об'єкту.

Випускаються УЗ сенсори відстані з різними параметрами, розрахованими як на невеликі відстані - від 15 до 200 мм з точністю до 0,2 мм, так і на середні відстані - від 0,3 до 6 м з точністю до 1 мм, а також на відстані в десятки метрів.

Вихід таких сенсорів може бути як цифровим, так і аналоговим. Якщо до складу УЗ сенсора входить мікрокомп'ютер, то завдяки вбудованим датчикам температури і тиску легко вирішується питання корекції результатів зроблених вимірів з урахуванням залежності швидкості поширення УЗ хвилі в повітрі від вказаних параметрів.

Якщо частота УЗ коливань фіксована, то за допомогою таких сенсорів можна визначати і швидкість руху об'єкту, вимірюючи доплерівське зрушення частоти відбитої хвилі. Якщо кутова діаграма спрямованості УЗ сенсора досить вузька (а це залежить від конструкції корпусу і наявності параболічного або сферичного рефлекторів) те, поступово повертаючи його в певному кутовому секторі, можна, як і в гідролокаторах, сканувати УЗ зондом і оглядати значнішу зону простору.



Рисунок 9.11 – УЗ вимірник рівня рідини Omni – L



Рівень рідини визначається з точністю близько 1 мм за часом запізнювання відбитого від поверхні рідини УЗ імпульсу. Багато спеціалізованих інтелектуальних акустичних сенсорів створені і застосовуються для дефектоскопії металевих заготовель (прокату, відливань...) і готових металоконструкцій. У основі їх роботи теж лежить принцип ехолокації, але вже в твердих тілах. У якихось місцях металевої конструкції збуджуються УЗ коливання, в інших - встановлені приймачі УЗ хвиль. Прийняті ними УЗ коливання піддаються математичному аналізу в мікрокомп'ютері. За результатами аналізу можна визначити механічний стан конструкції.

Такі спеціалізовані інтелектуальні акустичні сенсори дозволяють своєчасно виявляти тріщини, порожнечі, сторонні включення і інші дефекти в металевих виробах, явища "втоми" металів, небажані механічні зміни в конструкціях і запобігати можливим аваріям. У разі виникнення ушкоджень трубопроводів, безстикових рейок надшвидкісних залізниць і так далі інтелектуальні УЗ акустичні сенсори дозволяють швидко локалізувати місце ушкодження і відновити функціонування цих важливих магістралей.

### **Інтелектуальні портативні сенсори для УЗ досліджень**

Одним з важливих видів ехолокації є ультразвукові дослідження внутрішніх органів людини, які широко застосовують в медицині. Швидкість поширення УЗ хвиль в тканинах людського тіла складає близько 1540 м/с, тобто близька до швидкості у водному середовищі. Але із-за акустичної неоднорідності людського тіла на межах розділу органів і тканин з різною щільністю і пружністю, відбувається часткове відображення, розсіяння і заломлення УЗ хвиль. Чим більше перепаду щільності, тим вище амплітуда відбитої УЗ хвилі. Це і дозволяє визначати, а потім і відтворювати у вигляді зображення просторові межі між органами, тканинами і різними структурними елементами тканин, їх форму, розміри, взаємне розташування, локальні особливості. Застосовуючи УЗ хвилі високої частоти (1-15 МГц), вдається досягти високої роздільної здатності - до 0,1 мм. При відображенні від рухливих

об'єктів (дихальні переміщення грудної клітки, діафрагми, скорочення серця, пульсація артерій, просування крові по судинах і тому подібне) змінюється частота відбитою УЗ хвилі (ефект Доплера). Вимірюючи величину зміни частоти, можна вичислити відповідну швидкість руху і візуально виділяти ділянки внутрішніх органів, які рухаються з різною швидкістю, - навіть досить повільно (менше 1 см/с).

На рис. ліворуч показаний сучасний апарат SonoAce Pico для УЗ сканування людського тіла. Будучи переносним (357x320x204 мм, маса менше 10 кг), він має практично такі ж діагностичні можливості, як і традиційні стаціонарні апарати для УЗІ. Завдяки цифровій технології формування УЗ пучків і обробки сигналів він дозволяє отримувати кольорові зображення стану внутрішніх органів з високою роздільною здатністю.



Рисунок 9.12 – Портативні апарати для УЗ досліджень : ліворуч - SonoAce - Pico; справа - Fukuda UF - 750XT

Окрім можливості формування об'ємних зображень і застосування широкосмугових мультичастотних датчиків, він може виконувати функції формування трапецеїдального зображення, збільшення масштабу зображення при дослідженні малих органів. Він розрахований також на застосування мікроконвексного датчика, має програми кардіологічних досліджень. Можлива глибина сканування - до 30 см У базову комплектацію входять також електрокардіографічний модуль з програмним забезпеченням, система SonoView

Lite для архівації і подальшого перегляду ехограм, містка пам'ять, виходи для одночасного приєднання до базового блоку двох датчиків.

Можливе застосування багатьох прогресивних технологій ультрасонографії :

- Multi - beam - технологія цифрового формування УЗ пучків з пригніченням впливу багатократних відображень, нелінійних спотворень, неточності інтервалів затримки і т. п.
- OTI (Optimum Tissue Imaging) - технологія формування оптимального зображення тканини завдяки корекції швидкості (вибір оптимальної швидкості для кожної області, щоб забезпечити високу якість зображень одночасно усіх видів тканини, таких як жирова, м'язи або паренхіма печінки).
- THI (Tissue Harmonic Imaging - "тканинна" або друга гармоніка) - підвищує якість зображень, їх контраст і лінійну роздільну здатність у пацієнтів з ускладненою візуалізацією (наприклад, з товстими жировими прошарками).
- OHI (Optimized Harmonic Imaging) - застосовується в особливо важких для дослідження випадках. FINE (Filtered Image for Noise reduction & Edge enhancement) - технологія поліпшеної фільтрації УЗ сигналів, яка зменшує рівень шумів і забезпечує більш високий контраст.
- SAFE (Compound Automatic Flash Elimination) - забезпечує адаптивну нелінійну фільтрацію для видалення кольорових точок, які виникають внаслідок випадкових артефактів. Покращує візуалізацію кровотоку в доплерівських режимах.

Ультразвуковий діагностичний сканер Fukuda UF - 750xt показаний на рис. 9.13.

Він призначений для невідкладної (на виїздах) УЗ функціональної діагностики серцево- судинних захворювань, щитовидної і молочної залоз, бруньок, печінки, шлунку, жовчного міхура, статевих органів. Кольоровий рідкокристалічний дисплей з діагоналлю 265 мм забезпечує високу якість

зображень. Загальні габаритні розміри сканера 380x220x370 мм, маса - менше 13 кг. Оснащений магнітооптичним диском пам'яті на 640 Мбайт, на якому можуть зберігатися до 6 тисяч ехограм. Маючи приблизно такі ж функціональні можливості, як і попередній сканер, він забезпечує також УЗ дослідження слабкого і повільного кровотоку.



Рисунок 9.13 – Ультразвуковий діагностичний сканер Fukuda UF - 750xt

До складу програмного забезпечення входять:

- програмні пакети для вимірів, обчислень і автоматичного створення звітів (для акушерства, кардіології, ангіології, радіології, урології, гінекології, хірургії, педіатрії);
- програми об'ємної реконструкції з можливістю мультипланового аналізу, підтримки протоколу безпроводного зв'язку;
- програма формування і підтримки бази цих пацієнтів з можливістю перенесення даних на зовнішні носії і на зовнішній комп'ютер.

### **Сенсори на поверхневих акустичних хвилях**

Досі розглядалися сенсори, які використовують акустичні хвилі в об'ємі газів, рідин або твердих тел. Але є ще і велика група сенсорів, в яких використовується поширення акустичних хвиль по поверхні твердих тіл або в їх приповерхневій області.

Такі хвилі називають поверхневими акустичними хвилями (ПАХ) і відповідно приповерхневими акустичними хвилями (ППАХ). Для збудження і детектування ПАХ і ППАХ використовують прямий і зворотній п'єзоелектричний ефект. Найчастіше з цією метою на поверхні п'єзокристала, пьезокерамики або на п'єзоелектричній плівці формують так звані зустрічно-штирьові перетворювачі (ЗШП). Це - електроди, що мають форму гребінки, в яких довжина кожного штиря набагато більше ширини (рис. 9.14).

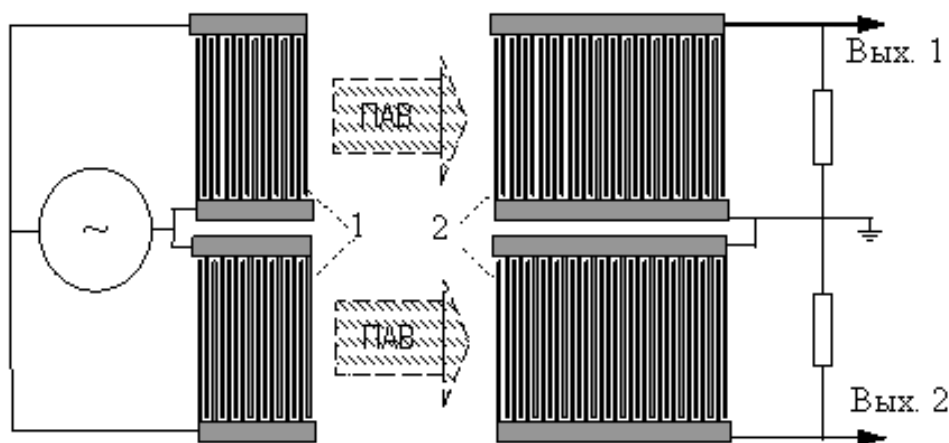


Рисунок 9.14 – Принцип дії сенсорів на ПАХ:

- 1 - зустрічно-штирьові перетворювачі електричного сигналу в ПАХ;
- 2 - зустрічно-штирьові перетворювачі ПАХ в електричний сигнал.

Коли на ЗШП 1 подається змінна напруга, в п'єзоелектричному матеріалі виникають хвилі механічного стискування і розтягування з частотою змінної напруги. Якщо відстань між штирями дорівнює довжині хвилі, то хвилі від усіх штирів виявляються синфазними і посилюють одна іншу. Виникає сильна резонансна поверхнева акустична хвиля. Швидкість поширення ПАХ в п'єзоматеріалах складає 3,8-4,2 км/с. Тому ПАХ з частотою 1 ГГц має довжину хвилі приблизно 4 мкм. Поширюючись уздовж поверхні п'єзоелектрика, ПАХ проходить відстань в 1 мм приблизно за 250 нс. Коли хвиля доходить до електродів 2, вона стає причиною виникнення між парою сусідніх штирів змінної електричної напруги тієї ж частоти. Коливання напруги між сусідніми парами штирів, складаються. Тому напруга на виході ЗШП виявляється найбільшою у

разі збігу їх фаз, тобто тоді, коли відстань між штирями сусідніх пар дорівнює довжині хвилі.

Таким чином, геометрична структура ЗШП забезпечує високу вибірковість приладів на ПАХ. Якщо ця структура строго періодична, то вона функціонує як високодобротний частотний фільтр. Якщо ж повинні прийматися лише сигнали, що певним чином модулюються по амплітуді, частоті, фазі і тому подібне, то використовується і відповідна геометрична структура ЗШП. Прилад на ПАХ функціонує тоді як високоефективний корелятор, що видає на виході пік напруги тільки тоді, коли просторово-часова структура поверхневої акустичної хвилі точно співпадає з геометричною структурою ЗШП. Прилад фазується і синхронізується з сигналом, який поступає на його вхід, автоматично, тобто сам і тільки у момент повного збігу структури хвилі і структури ЗШП.

Саме з цих причин прилади на ПАХ широко використовують в сучасній радіотехніці: і в мобільному радіозв'язку, і в системі глобального орієнтування GSM, в системах цифрового і локального безпроводного зв'язку і т.п. Із застосуванням ЗШП і ПАХ побудовані ефективні фільтри проміжної частоти, вихідні і багатомодові фільтри, що калібруються лінії затримки з дуже малим загасанням, фільтри Найквіста для цифрового телебачення і цифрового радіозв'язку, лінії затримки для кодового і тимчасового розділення каналів, фільтри систем волоконно-оптичного зв'язку і т.д.

Цікавим застосуванням відносно дешевих сенсорів на ПАХ стала автоматична радіоідентифікація багажу, контейнерів, транспортних одиниць, важливих поштових відправлень. Схема їх радіоідентифікації показана на рис. У багаж, що підлягає пильному контролю, за додаткову плату вкладають невеликий радіоідентифікатор з індивідуальним кодом. У аеропортах, на вокзалах, в морських або річкових портах, на транспортних вузлах і контрольних пунктах встановлюють системи автоматичної радіоідентифікації. До складу такої системи входить мікрокомп'ютер 1, що приймає через канали зв'язку запити на перевірку контрольованих вантажів. Отримавши запит з кодами контрольованих вантажів, він через генератор 2 і радіоантену 3 автоматично

організовує випромінювання радіосигналів, що фазо-маніпульованих, на частоті близько 1 ГГц з позивними відповідних вантажів. Радіоідентифікатори, вкладені у вантажі, приймають ці позивні, посилюють і подають на свій індивідуальний ПАХ селектор.

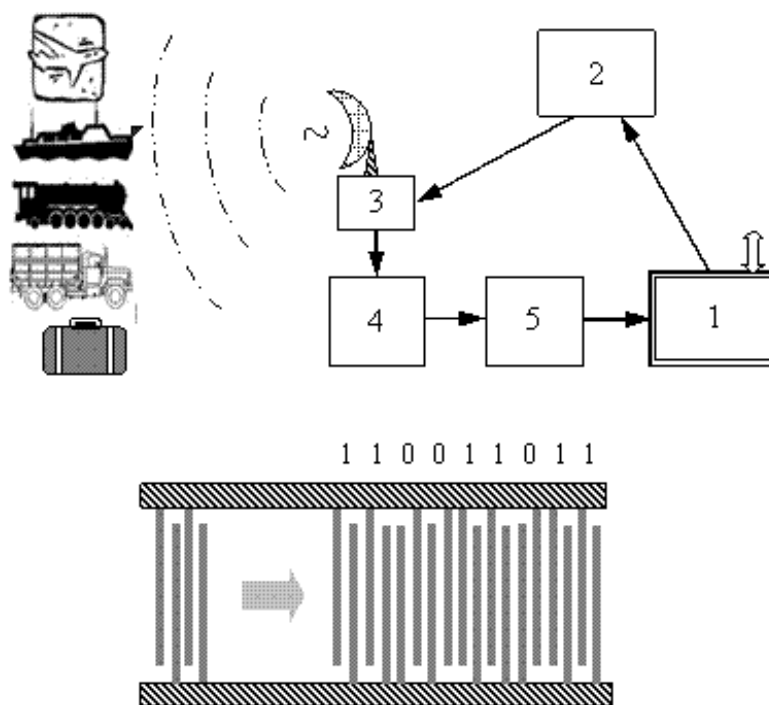


Рисунок 9.15 – Схема функціонування системи радіоідентифікації багажу.

Знизу – структура ЗШП, що відповідає коду "110011011"

Цей відгук приймається антеною 3, посилюється радіоприймачем 4 і передається на фазовий детектор 5, який формує двійковий код. Мікрокомп'ютер 1 порівнює цей код з кодом контрольованого вантажу і, якщо вони співпадають, фіксує це у своїй пам'яті. Потім за допомогою генератора 2 і радіоантени 3 випромінюються позивні наступного контрольованого вантажу, і процес повторюється. Після обробки усього запиту мікрокомп'ютер формує відповідь на нього і через канали зв'язку автоматично інформує того, що просить про наявність або відсутність в цьому контрольному пункті відповідних вантажів.



Рисунок 9.16 – Мікроваги XP - Мікро компанії Метлер Толедо на ПАХ

З використанням ПАХ елементів нині випускають дуже чутливі мікроваги. Як приклад на рис. 9.16. показані мікроваги XP - Мікро компанії Метлер Толедо. Зважування маси до 52 г з дискретністю 1 мкг. Габаритні розміри 263 x 490 x 322 мм. Вони мають вбудований мікрокомп'ютер, електронний контроль горизонтального рівня, подвійний термостатований кожух зі знепилюванням, кольоровий сенсорний дисплей, можливість під'єднання до електронної інформаційної мережі, безпроводного зв'язку через інтерфейс Bluetooth. Ретельно продумані усі нюанси зважування дуже малих доз дорогих речовин. Зазвичай зважувану дозу кладуть в "човник", бюксу або на листочок кальки, і при перенесенні можливі її втрати. У цих вагах забезпечується можливість дозування навішування відразу ж в кінцеву тару через маленьке віконце в дверцях, завдяки чому виключаються небезпечні рухи повітря усередині робочого об'єму вагів при зважуванні. Досягається відтворюваність результатів зважування краще 1,5 мкг, і значно знижуються втрати дуже дорогих реагентів.

Такі високоточні і швидкодіючі ваги використовуються, наприклад, в лабораторіях тонких хімічних і біохімічних аналізів і синтезів в таких сферах застосування, як фармацевтична і косметична промисловість, здобич і обробка дорогоцінних рідкісних металів, геологічна розвідка, мікроелектроніка, кольорова металургія, судова експертиза, наукові дослідження і т.п.



## **Хімічні і біохімічні сенсори на ПАХ**

Якщо на чутливу зону нанести спеціальне покриття (оксиди металів, полімерні плівки і тому подібне), що вибірково сорбувало молекули певного газу або пари з навколишнього повітря, то отримаємо досить чутливий ПАХ сенсор присутності в повітрі відповідних речовин. Вже розроблені і промислово випускаються ПАХ сенсори для контролю наявності більшості важливих органічних і неорганічних газів в технологічному середовищі і в атмосфері приміщень.

За останнє десятиліття були створені також матричні ПАХ сенсори. Їх ще називають мультисенсорами. У них на одному кристалі формується одночасно цілий масив ППАХ сенсорів, на кожного з яких наносять свою чутливу плівку. Більшість розробок виконана в області мультисенсорних газоаналізаторів, в яких контрольований об'єм повітря аналізується на присутність відразу десятків різних речовин.

## **Електричні сенсори**

У широкому сенсі все або майже усі інтелектуальні сенсори можна віднести до класу електричних. Адже, врешті-решт, будь-які сигнали в інтелектуальних сенсорах перетворюються на електричні сигнали, з якими працює мікрокомп'ютер. В механічних і в акустичних сенсорах майже завжди є чутливі елементи, що перетворюють механічні або акустичні сигнали на електричні. Така ситуація дуже часто має місце і в усіх інших класах інтелектуальних сенсорів. Електричні сенсори, що є складовими частинами інших сенсорів, зазвичай розглядаються в таких випадках як "трансд'юсери", - перетворювачі інших видів сигналів в електричну форму. У них зміна електричних властивостей є вже вторинною, - наслідком первинних змін механічних, акустичних або інших властивостей. Перехід до електричної форми сигналів потрібний лише для зручності їх подальшої обробки. Проте, такі трансд'юсери і у складі інших сенсорів самі по собі залишаються електричними сенсорами.

Електричними властивостями тіл є: їх електричний заряд, електричний потенціал, конфігурація створюваного електричного поля, електроємність і тому подібне. До електричних властивостей речовин належать їх електропровідність або електричний опір, діелектрична постійна  $\epsilon$ , в загальнішому випадку, - їх комплексна діелектрична постійна. До властивостей електричних ланцюгів можна віднести напругу на тій або іншій ділянці ланцюга; струм, що протікає через них; для ланцюгів змінного струму - імпеданс, амплітуду, частоту і фазу коливань струму, власні резонансні частоти і тому подібне. Якщо будь-яка з цих властивостей змінюється під дією чинників або процесів, за якими вимагається "спостерігати", то ці зміни можна реєструвати і на цій основі будувати певні висновки про об'єкт спостереження.



Рисунок 9.17 – Класифікація електричних сенсорів по фізичному принципу дії

До активних чутливих елементів відносять транзистори, діоди, нелінійні електронні елементи, що мають ділянки вольтамперної характеристики з негативним нахилом, газорозрядні і інші елементи, усередині яких викликані зовнішнім впливом невеликі зміни відразу ж значно посилюються за рахунок

зовнішнього джерела енергії. Зазвичай вважають, що усі активні чутливі елементи є "струмовими", тобто під впливом контрольованого зовнішнього чинника змінюється електричний струм, що протікає крізь них.

Пасивні чутливі елементи класифікують по виду електричної характеристики, що змінюється під впливом контрольованого чинника, на резистивні, ємнісні і так далі. Далі їх можна класифікувати на підвиди залежно від того, під дією якого саме зовнішнього чинника змінюються їх електричні характеристики (пьезорезистори, терморезистори, фоторезистори ...).

### **Резистивні сенсори**

Одними з простих електричних сенсорів є резистивні сенсори, в яких під дією зовнішнього чинника змінюється опір тієї або іншої ділянки електричному ланцюгу. Як сказано вже вище, їх ми класифікуватимемо, виходячи з того зовнішнього чинника, під дією якого змінюється електричний опір резистора.

Відомим прикладом резисторів, що реагують на механічну дію, є сенсори -"вахтери" для спостереження за цілісністю шибок. По поверхні скла простягають "мереживо" з тонкої, майже непомітної тяганини. Сенсор вимірює і контролює загальний опір цього "мережива" тяганини. Якщо скло розбивається, то деяка тяганина неминуче розривається, внаслідок чого загальний електричний опір змінюється. Реєструючи таку зміну, сенсор подає сигнал тривоги.

### **Терморезистори**

Терморезистори – резистори, у яких електричний опір провідника або напівпровідника залежить від температури.

Значніші за величиною і різні по знаку температурні коефіцієнти електричного опору мають напівпровідники. Напівпровідникові терморезистори прийнято називати термісторами. Вводячи в кремній незначні домішки, можна отримати в певних температурних діапазонах як позитивний, так і майже нульовий, а також негативний температурний коефіцієнт опору. Особливо широко в ролі термісторів застосовують оксиди металів. Їх виготовляють у

вигляді тонких і товстих плівок, маленьких керамічних пластинок, стержнів, циліндрів, невеликих намистинок і т.д.

Одним з прикладів можливої реалізації інтелектуального сенсора на основі терморезисторів є так звані "PID-регулятори температури" (наприклад, типів T16/P16 і T48), які випускаються промислово. Невеликі по розмірах (50×50×106 мм), вони задовольняють жорстким вимогам промислових застосувань IP65.

Їх входи розраховані на підключення стандартних платинових терморезисторів Pt100 (2 або 3, діапазон зміни опору від 1 до 320 Ом) або терморезисторів типів S, T, J, N, K, E, R, B. Виміри відбуваються кожні 0,4 с.

Користувач може вибрати різні режими роботи: пасивне стеження за змінами температури, автоматична сигналізація про вихід температури за задані межі, автоматичне регулювання температури через вихідні силові реле по декількох різних оптимальних алгоритмах. Поточне значення температури чітко висвічується на світлодіодних індикаторах у вказаних користувачем одиницях. Туди ж виводиться і інша важлива інформація. Про розробку аналогічного інтелектуального сенсора температури з погрішністю вимірів, що не перевищує 0,1%.

З використанням мікрокомп'ютерів і набору мініатюрних термісторів, що мають дуже малу власну теплоємність і незначну теплову інерцію, можна будувати складніші інтелектуальні сенсори.

Приклад інтелектуального сенсора для спостереження за змінами об'ємного потоку рідини уздовж стебла або гілок рослини. У таких сенсорах використовують 3 термістори: один - для контролю температури в місці нагріву, другий - для виміру температури стебла на заданій відстані від місця нагріву, третій - для виміру температури доквілля. Сигнали від першого служать для точного регулювання і підтримки заданої температури в місці нагріву. Це важливо, оскільки підвищення температури вище за фізіологічну межу може негативно вплинути на життєдіяльність рослини. Сигнали від другого термістора дозволяють мікрокомп'ютеру вчислити об'ємний потік рідини. А сигнали від

третього дають можливість врахувати поправку, пов'язану з віддачею тепла в те, що оточуючий простір.

Їх електричний опір залежить від освітленості. Фоторезистори виготовляють найчастіше з напівпровідників групи АІІВVI(CdS, CdSe, CdTe,...) шляхом напилення тонких шарів або намазування товстих шарів з подальшим спіканням пластинів, рідше - з монокристалів. Зміна їх електричного опору під дією світла відбувається завдяки внутрішньому фотоефекту, тобто завдяки тому, що при поглинанні квантів світла в напівпровіднику з'являються додаткові вільні носії електричного заряду.

Від матеріалу, з якого виготовлений фоторезистор, і від внесених в нього домішок залежить спектральна характеристика, тобто залежність чутливості фоторезистора від довжини хвилі світла, що падає. Спектри чутливості існуючих фоторезисторів перекривають увесь широкий оптичний діапазон спектру від ультрафіолетової до далекої інфрачервоної області. Синтезовані також фоторезистори, які практично повторюють спектральну криву чутливості людського ока. Саме їх рекомендують застосовувати для точної фотометрії, тобто для вимірів характеристик світла в так званих "світлових одиницях" (люменах, люксах, канделах і т.п.).

З використанням фоторезисторів можна побудувати багато видів інтелектуальних сенсорів як дослідницького, так і прикладного характеру. В якості прикладів можна згадати схеми автоматичного визначення витримки у фотоапаратах, в автоматах друку фотознімків, схеми автоматичного управління штучним освітленням і т.д.

### **П'єзорезистори**

Якщо на металевий дріт діє сила, яка розтягує її, то в результаті деформації довжина дроту дещо збільшується, а площа поперечного перерізу дещо зменшується. Через це електричний опір дроту зростає. Таке явище називають п'єзорезистивним (від грецького кореня) або тензорезистивним (від латинського кореня) ефектом.

Значно більш високу тензочуттєвість, ніж металеві, мають напівпровідникові п'езорезистори, оскільки механізм зміни електричного опору в них набагато складніший. Тензочуттєвість резисторів, наприклад, з кремнію в десятки разів вище, ніж у металевих. Але їх електричний опір також значно сильніше залежить від температури. Для зменшення впливу на результати вимірів неконтрольованих змін температури застосовують мостові схеми. У одно їх плече включений навантажений п'езорезистор (на який діє вимірювана сила), а в інше - такий самий резистор, але механічно не навантажений. При змінах температури співвідношення опорів і баланс моста не змінюються.

### **Гігристори**

Електричний опір деяких гігроскопічних матеріалів істотно залежить від вологості навколишнього повітря. Резистори з таких матеріалів називають гігристорами і застосовують в сенсорах вологості. Для цього синтезовані спеціальні матеріали: нонілфенілполіетиленглікольєфір, гідроксіетілцелюлоза і тому подібне з наповненням вугільним порошком. У складі інтелектуального сенсора можна врахувати зміни цієї залежності з температурою, а також деяке запізнювання зміни електричного опору гігристора при швидких змінах вологості повітря, запам'ятовувати динаміку змін вологості за певний період для подальшої передачі в комп'ютерну мережу, для документування, прогнозування і т.д.

### **Магніторезистивні сенсори**

У магніторезистивних сенсорах використовується здатність деяких матеріалів істотно змінювати свою електропровідність залежно від напрямку і напруженості зовнішнього магнітного поля. До таких матеріалів відносяться, наприклад, плівки пермалою (NiFe). Найчастіше застосовують структуру, в якій чутливий елемент складається з 4 плівкових резисторів з пермалою, напилених на поверхню кремнію і сполучених у вигляді мостової вимірювальної схеми. Згори магніторезистивні плівки захищають тонким шаром нітриду танталу.

Поруч формують мініатюрні плоскі плівкові котушки. Коли через одну з них пропускають електричний струм, створюване ним магнітне поле орієнтує домени пермалоєвих плівок уздовж осі резисторів. Саме у такому стані вони мають найбільшу чутливість. Це робиться кожного разу перед початком серії вимірів.

Через іншу котушку при вимірах пропускають постійний електричний струм, необхідний для компенсації залишкового зовнішнього магнітного поля, перпендикулярного до площини резисторів, і таким чином балансують вимірювальну мостову схему. При появі вимірюваного зовнішнього магнітного поля відбувається розбаланс моста, а вихідний сигнал пропорційний магнітній індукції зовнішнього поля. Усі необхідні схеми формують в тому ж самому кристалі кремнію.

Компенсаційну котушку використовують також для калібрування і для повного балансування моста. Різниця між струмом балансування і початковим компенсаційним струмом пропорційна індукції зовнішнього магнітного поля. Така схема забезпечує високу лінійність вимірів, малу їх залежність від температури і від інших перешкод (наприклад, від наявності поблизу деталей з феромагнітних матеріалів).

Окрім "одновісних" магніторезистивних датчиків, чутливих до магнітного поля одного напрямку, випускають також "двовісні" і "тривісні" датчики, в яких 2 або 3 магніторезистивні датчики орієнтовані у взаємно перпендикулярних напрямках. З них виготовляють також сучасні високонадійні компаси без магнітної стрілки і взагалі без рухливих деталей, а також високоточні сенсори напрямку руху ("датчики курсу") для авіаційних, морських, автомобільних транспортних засобів.

На рис. 9.18 ліворуч показаний аналоговий магніторезистивний компас НМС6052, в якому використовується двовісний сенсор НМС1052 розміром 3,5×3,5 мм з мінімальним вимірюваним магнітним полем 80 мкГс (магнітне поле Землі близько 600 мГс). Компас працює в діапазоні температур від - 45°C до +120°C, має інтерфейс до ПК.

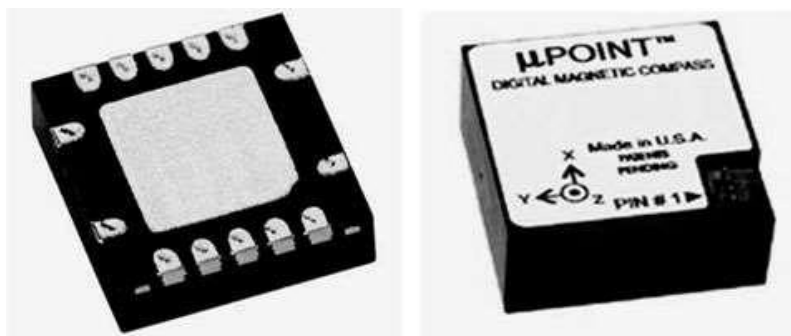


Рисунок 9.18 – Магніторезистивні компаси

На рис. 9.18 праворуч показаний мініатюрний цифровий гіростабілізований прецизійний компас HMR3600, призначений для визначення азимута, працюючий при будь-якій орієнтації в просторі. Окрім трьох магніторезистивних магнітометрів, до його складу входять три акселерометри і гіроскоп. Компас визначає азимут, подовжній і поперечний крен з точністю  $\pm 0,5^\circ$  при роздільній здатності  $0,1^\circ$ . Застосовується в авіації, мореплаванні, на наземному транспорті, в лазерних далекомірах, блоках управління відеокамерами, при підземній і підводній орієнтації.