

# МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ

## METHODS AND DEVICES FOR TEMPERATURE DISTRIBUTION MEASUREMENT

*Андрій Озгович, О. Панчук, 2*  
*Національний університет "Львівська політехніка", Україна*

*Andriy Ozhovych, Olena Panchuk, 2017*  
*Lviv Polytechnic National University, Ukraine*

### Анотація

Проаналізовано методи вимірювання розподілу температури і можливості їх застосування в різних галузях. Наведено класифікацію методів і подано порівняльну характеристику переваг та недоліків. Зроблено висновок, що розвиток методів вимірювання температурного розподілу є актуальною задачею наукових досліджень, які дадуть змогу відкрити нові перспективи та розширити області застосування методів вимірювання розподілу температури.

**Ключові слова:** розподіл температури, вимірювання, термографія, тепловізор, томографія, ультразвуковий метод вимірювання, акустичний метод вимірювання, матричний сенсор.

### Abstract

The methods of measuring temperature distribution and their application in different fields are analyzed. Classification of methods with comparative description of advantages and disadvantages is given. It is concluded that the development of methods for measuring temperature distribution is an urgent research issue, which enables us to find new perspectives and expand the scope of application of methods for measuring temperature distribution.

Measurement of temperature distribution is an important task in power engineering and energy audit, electric engineering and constructing, oil and chemical industry, transport, medicine, etc. Temperature distribution is important for detection of the thermal insulation of buildings, defects in joints of panels, cracks, deterioration of thermal insulation properties, areas of water infiltration, breakages of reinforcement; in power engineering for thermal imager's monitoring of power lines, detection of defective contacts of switching device connections; in energy conservation with energy audit, determination of insulation properties of materials, diagnostics of fencing structures, detection of heat losses in indoor and outdoor buildings and constructions; in the chemical industry for monitoring the temperature of the product, inspection of tightness and isolation of containers for storage of various liquids and gases; in aerospace and military technology for targeting systems, warning systems for early launching of missiles, thermal intelligence (detection of live power and technology), aerospace shooting with help of the thermal imagers; in medicine for monitoring inflammatory processes, local tumors, blood circulation disorders, wound healing processes, injuries, etc.

The significance of temperature measurements is also underlined by the fact that in industries with a continuous nature of technological processes, temperature measurement consists about 50 % of the total quantity of measurements. Thus, the development and creation of new means for measuring the temperature distribution is an urgent task.

This paper deals with the following methods and means of measuring temperature distribution: thermographic, in particular the analysis of thermal imagers, tomographic, acoustic, ultrasound, multizone sensors of temperature, matrix infrared sensors.

**Keywords:** Temperature Distribution, Measurement, Thermography, Thermal Imager, Tomography, Ultrasonic Measurement Method, Acoustic Measurement Method, Matrix Sensor.

**Вступ.** Вимірювання розподілу температури є важливим завданням в енергетиці і енергоаудиті, машинобудуванні, будівництві, нафтовій і хімічній промисловості, транспорті, медицині та ін. Вимірювання розподілу температури використовують при експлуатації будівель для виявлення порушення теплоізоляції та інших втрат тепла, виявлення дефектів стиків панелей, тріщин, погіршення теплоізоляційних властивостей, ділянок інфільтрації води, обривів арматур; у енергетиці для тепловізійного моніторингу ліній електропередач, виявлення дефектних контактів з'єднань комутаційних апаратів; в енергозбереженні при енергоаудиті, визначенні теплоізоляційних властивостей матеріалів, діагностиці огорожуючих конструкцій, виявленні тепловтрат у внутрішніх приміщеннях і зовні будинків і споруджень; у хімічній промисловості для контролю температури продукту, перевірки герметичності та ізоляції ємностей для зберігання різних рідин і газів; в авіакосмічній і військовій техніці для систем самонаведення на ціль, систем оповіщення про ранній запуск ракет, теплової розвідки (виявлення живої сили і техніки), авіакосмічної зйомки тепловізором; в медицині для моніторингу запальних процесів, локальних пухлин, порушення кровообігу, процесів загоєння ран, травм та ін.

Значимість температурних вимірювань підкреслює і той факт, що на виробництвах з неперервним характером технологічних процесів вимірювання температури складає приблизно 50 % від загального числа всіх вимірювань. Таким чином розроблення і створення нових засобів вимірювання розподілу температури є актуальним завданням.

**Метою роботи** є аналіз переваг та недоліків різних методів і засобів вимірювання температури, порівняння характеристик цих методів, аналіз можливостей застосування в різних галузях.

Таблиця 1

### Класифікації методів вимірювання температури

#### Classification of temperature measurement methods

	По площині	Вздовж осі
<b>Контактні</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Багатозонні сенсори температури</li> </ul>
<b>Безконтактні</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Термографічний метод</li> <li>Томографічний метод</li> <li>Матричні сенсори ІЧ випромінювання</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Акустичний метод</li> <li>Ультразвуковий метод</li> </ul>

**1. Термографічний метод. Тепловізори.** Вимірювання розподілу температури об'єктів здійснюється тепловізорами – оптико-електронними приладами, які служать для вимірювання температури та градієнту температур в інфрачервоному діапазоні спектру з подальшою візуалізацією теплового поля об'єкта на екрані. Тепловізор може використовуватися як прилад для безконтактного вимірювання температури об'єктів і температурних полів. Сучасний тепловізор складається з: об'єктива, тепловізійної матриці (чутливий елемент) і електронного блоку опрацювання сигналу. Тепловізійна матриця - це ґратка мініатюрних детекторів, що сприймає інфрачервоне випромінювання і перетворює його в електричні імпульси, які після підсилення перетворюються у відеосигнал. Типовий розмір фотоелектричних матриць становить 640×480 пікселів. Тепловізори поділяють на дві категорії: з охолоджуваною і неоохолоджуваною матрицею. Охолоджувані – найчутливіші, дорогі і масивні, адже для охолодження використовуються криогенні технології, що дозволяють охолоджувати матрицю до температур мінус 170-210 °С. Ціна і маса визначають і сферу застосування таких приладів. Недоліки камер з охолоджуваними матрицями - велике енергоспоживання і короткий термін служби криогенної системи, висока вартість та тривалий термін підготовки до роботи. Тепловізори з неоохолоджуваними матрицями – значно дешевші, компактніші, але мають меншу чутливість. Перевага їх у тому, що вони починають працювати відразу після включення, мають довгий термін служби і низьке споживання енергії. Простота і відносна дешевизна неоохолоджуваних тепловізорів зробили їх масовими [1].

На рис.1 наведена узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІЧ-матрицею.

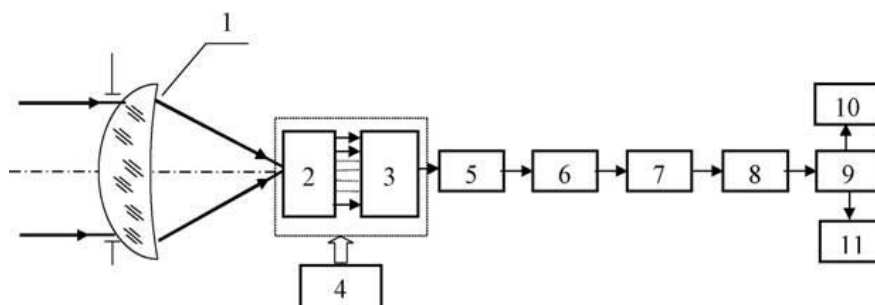


Рисунок 1 - Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею: 1 - оптична система; 2 - фокальна матриця із підсилювачами; 3 - мультиплексор; 4 - система охолодження; 5 - коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 - аналого-цифровий перетворювач; 7 - цифровий коректор неоднорідності; 8 - коректор; 9 - формувач зображення; 10 - дисплей; 11 - цифровий вихід

Figure 1 - General functional diagram of the thermal imager with focal matrix: 1 - optical system; 2 - focal matrix with amplifiers; 3 - multiplexer; 4 - cooling system; 5 - corrector of heterogeneity of characteristics of sensitive elements; 6 - analog-digital converter; 7 - digital correction of heterogeneity; 8 - proofreader; 9 - image shaper; 10 - display; 11 - digital output

Тепловізори реєструють власне випромінювання предметів. Кожне нагріте тіло емітує теплове випромінювання, інтенсивність і спектр якого залежать від властивостей тіла і його температури. Інфрачервоне (теплове) випромінювання від вимірюваного об'єкта через оптичну систему передається на приймач - неохолоджувану матрицю термодетекторів. Далі отриманий відеосигнал за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичного опрацювання перетворюється в цифрову форму і відображається на екрані комп'ютера або дисплеї тепловізора. Фізична картина фотоефекта наступна: ІЧ-фотони, потрапляючи на поверхню вузькозонного напівпровідника (HgCdTe, InSb), переводять носіїв заряду зі зв'язаного стану у вільний. Їх кількість пропорційна інтенсивності теплового випромінювання об'єкта. Матриця фотоелектричних детекторів, яка встановлена у тепловізорі, обов'язково повинна охолоджуватися, інакше власні теплові коливання ґратки напівпровідника викликають настільки інтенсивне вивільнення носіїв заряду, що на його фоні генерування носіїв ІЧ-випромінювання стає просто непомітим. Програмне забезпечення тепловізора дозволяє налаштувати і змінювати основні параметри збереженого зображення (компенсацію відбитого тепла, колірну палітру і т.д.). Це не тільки підвищує зручність і вірогідність обстеження тепловізором, але і відкидає необхідність повторного сканування.

Області застосування тепловізорів: енергетика і енергоаудит, машинобудування, будівництво, нафтова і хімічна промисловість, транспорт та ін. За допомогою тепловізора можна оперативного визначити передумови виникнення і наявність дефектів у нафто- і газопроводах, у теплотрасах, водопроводах і електричних з'єднаннях. Своєчасне виявлення за допомогою тепловізора температурних аномалій, що відбивають невидимі небезпечні процеси навколо нас, дозволить взяти заходів для усунення причин можливих аварій.

Головна проблема тепловізорів – висока вартість, зумовлена особливостями їх конструкції. Для виготовлення тепловізійних об'єктивів застосовується дуже дорогий матеріал - чистий германій. На відміну від звичайного скла, яке не пропускає теплове випромінювання, германій – це метал, прозорий для теплових інфрачервоних хвиль. Зараз вартість об'єктива становить приблизно 45% вартості всього приладу, ще 45% - матриця. Окрім германію, для виготовлення лінз використовують інші дорогі матеріали: селенід цинку, сульфід цинку, флюорид кальцію та халькогенідне скло.

У відповідь на попит, що зростає, вдосконалюються і прилади – зменшується їх розмір та знижується вартість. Вдосконалення відбувається за рахунок зменшення розмірів об'єктивів, виготовлення об'єктивів не з германію, а з більш дешевших матеріалів, та зниження вартості виробництва болометричних матриць. Отже тепловізори у наш час стають все доступнішими широкому загалу.

Недолік – тепловізор може вимірювати температуру лише тих об'єктів які є в зоні прямої видимості приладу.

Сучасні промислові тепловізори дозволяють вимірювати температури в діапазоні від 50 до 2 000 °С.

Основними технічними параметрами тепловізорів є:

- діапазон вимірюваних температур;
- роздільна здатність по температурі (різниця температур, еквівалентна шуму);
- поле зору;
- миттєве поле зору (просторова роздільна здатність);
- робочий спектральний діапазон;
- кількість елементів у приймачі випромінювання.

**2. Томографічний метод.** У електричній томографії просторовий розподіл температури отримують на основі результатів вимірювань електричного опору під час електричного зондування об'єкту. Якщо на досліджувану поверхню неможливо нанести термочутливий резистивний перетворювач, то одним із способів вирішення цієї проблеми є застосування вимірювальних перетворювачів температури у формі лінійних (дротяних) чутливих елементів (ЧЕ). Як приклад, на рис. 2 показано можливе розміщення чутливих елементів на поверхні досліджуваного об'єкта. Кінці кожного з ЧЕ закріплені на краях досліджуваного об'єкта, так, щоб забезпечити легкий доступ під час вимірювання їх опорів.

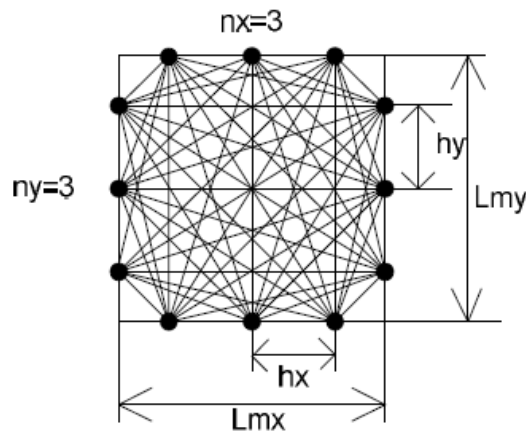


Рисунок 2 - Можливі розміщення лінійних резистивних чутливих елементів на поверхні прямокутної форми для кількості під'єднань на краях стінки:  $n_x = 3$ ,  $n_y = 3$

Figure 2 - Possible placement of linear resistive sensitive elements on the surface of a rectangular shape for the number connections at the edges of the wall:  $n_x = 3$ ,  $n_y = 3$

Відомо, що питомий опір провідників залежить від температури  $\Theta$ :

$$\rho = \rho(\theta) \quad (1)$$

Якщо помістити лінійний резистивний ЧЕ у середовище з просторовим температурним розподілом  $\Theta(x,y)$ , то питомий опір вздовж дроту, наприклад, вздовж лінії  $l_j$  буде змінним

$$\rho(l) = \rho[l(\theta(x, y))] \quad (2)$$

Важко переоцінити перспективи, які відкриваються з практичним застосуванням томографічних вимірювань в промисловості та в наукових дослідженнях. Такі вимірювання мають певні переваги перед традиційними, найголовніші серед яких полягають у тому, що в результаті томографічних вимірювань отримують інформацію про просторовий розподіл (а не локальне значення) досліджуваного параметра об'єкту, при цьому відбір вимірювальної інформації здійснюється без розміщення вимірювальних перетворювачів всередині об'єкту, а лише на його зовнішній границі. Тобто можна говорити про томографічні вимірювання як безконтактні вимірювання. Діапазон вимірювання визначається характеристиками матеріалу, з якого виготовлено чутливі елементи [2].

**3. Акустичний метод.** При роботі в екстремальних умовах (в діапазоні криогенних температур, при високих рівнях радіації та ін.) а також при проведенні вимірювань в замкнутому герметичному об'ємі, де неможливо розмістити контактні сенсори або використовувати інфрачервоні перетворювачі, буває дуже складно виміряти температуру об'єкта або середовища. У таких випадках застосовують акустичні сенсори температури, принцип дії яких заснований на функціональній залежності швидкості звуку від температури середовища, через яку він поширюється.

Акустичний сенсор температури складається з трьох компонентів: ультразвукового випромінювача і приймача, а також герметичної порожнини, наприклад, трубки, заповненої газом. Випромінювач і приймач - це керамічні п'єзоелектричні пластини, акустично не зв'язані з трубкою, що забезпечує поширення звуку переважно через газ усередині трубки. Як газ найчастіше використовують повітря. Використовують також конструкції перетворювачів, в яких звук поширюється безпосередньо в досліджуваному середовищі. Але при цьому необхідно дотримуватися умови сталості маси в вимірюваному обсязі газу. Для виготовлення трубки часто використовують інвар [3].

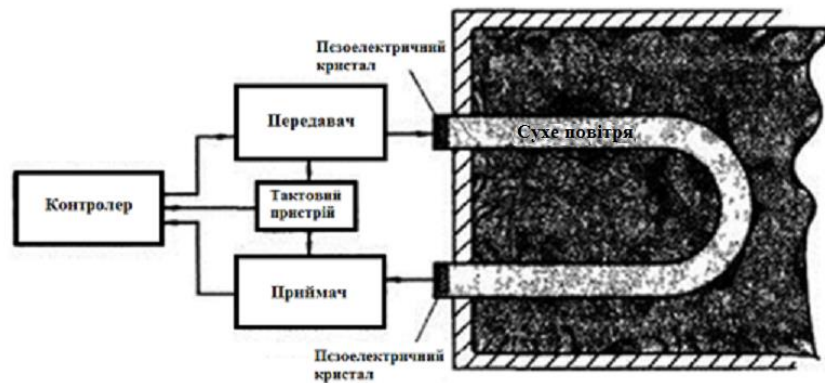


Рисунок 3 – Акустичний термометр з ультразвуковим перетворювачем  
 Figure 3 - An acoustic thermometer with an ultrasonic transducer

Тактовий пристрій даного приладу працює на низькій частоті (близько 100 Гц). Його імпульси запускають передавач і блокують приймач. Приймач приймає сигнал лише тоді, коли на нього приходить сигнал дозволу. Блок управління по часу поширення звукової хвилі в середовищі визначає швидкість звуку, по якій обчислюється температура середовища.

При використанні відбитого сигналу застосовують схеми з одним п'єзоелементом, які працюють на випромінювання і прийом акустичного сигналу.

На основі цих сенсорів створюють мініатюрні сенсори температури. Їх принцип дії заснований на використанні температурної залежності умов поширення поверхневих хвиль в чутливому елементі сенсора. Такі сенсори є перетворювачами температури в частоту. Чутливість таких пристроїв досягає десятків кілогерц на один градус.

**4. Ультразвуковий метод.** Ультразвукові методи займають провідне місце серед методів вимірювання та контролю у вимірювальній техніці. Це пов'язано з загальним прогресом акустики, як науки, розвитком фізики твердого тіла, мікроелектроніки і т.ін. Вже перші експериментальні зразки ультразвукових термометрів в процесі випробувань (Белл, Тасман, Ліїшвос та ін.) виявили низку переваг перед традиційними засобами вимірювання температури.

Перспективи застосування ультразвукових термометрів наочно проявилися при їх випробуваннях та експлуатації в реакторних енергетичних установках (Тасман, Європейська комісія з атомної енергії). Зокрема, в процесі експлуатації ультразвукового імпульсного термометра в умовах реакторного випромінювання на протязі 2000 год. при температурі 2000 °С спостерігалася зміна номінальної статичної характеристики (НСХ) на 1.5%, в той час, як НСХ термопар типу ВР(А) в тих самих умовах змістилися на 30%. Слід зазначити, що в багатьох випадках ультразвукові термометри за рахунок своїх переваг дозволяють проводити вимірювання температури об'єктів, сам доступ до яких традиційним засобам вимірювання є обмежений або навіть неможливий.

Необхідно взяти до уваги, що для керування технологічними процесами в енергетичних та промислових об'єктах недостатньо мати значення температури об'єкта в окремих точках, а необхідно володіти інформацією про розподіл температури в ньому. Проведені автором дослідження показали, що ультразвукові імпульсні термометри дозволяють успішно розв'язати цю задачу для об'єктів різного ступеня складності. Актуальність проблеми створення та застосування ультразвукових термометрів пов'язана також з проблемами енерго- та ресурсозбереження і пошуком альтернативи термоперетворювачам на основі металів платинової групи [4].

Ультразвуковий багатозонний імпульсний термометр працює переважно в режимі відбивання і вимірює часовий інтервал між парою відбитих сигналів від початку та кінця вибраної вимірювальної зони.

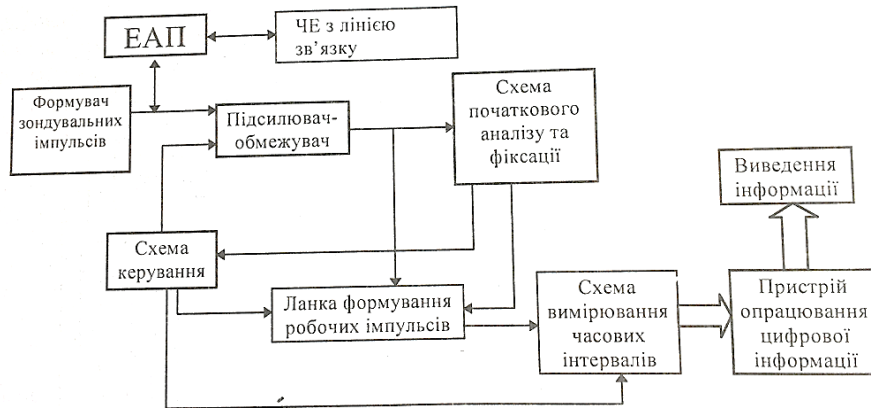


Рисунок 4 – Спрощена структурна схема багатозонного імпульсного термометра  
 Figure 4 - Simplified structural diagram of multi-zone pulse thermometer

На рис.4 наведена спрощена структурна схема багатозонного імпульсного термометра. Вона включає п'ятизонний чутливий елемент, який акустичною лінійю зв'язку з'єднаний з ЕАП. Останній повинен забезпечувати випромінювання коротких акустичних імпульсів та приймання луна-сигналів, відбитих від елемента відбивання. Згадані луна-сигнали подаються на схему виділення робочих сигналів, що відсікає паразитні сигнали та завади. Для цього ж призначена і схема початкового аналізу та фіксації, за допомогою якої відбувається початкове шукання корисних луна-сигналів під час вмикання приладу в мережу. Далі треба забезпечувати послідовне вимірювання часових інтервалів між вибраними парами луна-імпульсів, опрацювання цифрової інформації (усереднення низки результатів, операції перевірки для усунення промахів тощо) та виведення її на індикатор [5].

**5. Багатозонні сенсори температури.** Багатозонні сенсори температури застосовуються як правило в каталітичних процесах і резервуарах зберігання. Для контролю протікання реакції в реакторах вимірюється профіль температури в шарах каталізатора в одній або декількох площинах (наприклад, в нижній, верхній і середній частинах шару каталізатора). Як правило, в процесах, в яких температура протікання реакції становить + 300 ° С і більше, в якості чутливих елементів застосовуються термопари (перетворювачі термоелектричні), а в резервуарах зберігання – терморезистори Pt100 (термоперетворювачі опору платинові).



Багатозонні сенсори температури застосовуються для скорочення кількості приєднань до процесу і досягнення потрібних точок вимірювання температури в тривимірному просторі всередині технологічного апарату. А також для підвищення швидкодії вимірювального приладу і, як наслідок, для підвищення ефективності вимірювання температури процесу.

Рисунок 5 – Система багатоточкового вимірювання температури TTSP  
 Figure 5 - Multi-point TTSP temperature measurement system

Компанія Endress + Hauser пропонує стандартизовані багатозонні сенсори температури для різних галузей і сфер застосування:

- 3-D конструкція з розподілом чутливих елементів в шарах каталізатора;
- 1-D конструкція для монтажу в існуючу на апараті термогільзу;
- Малоінвазивні багатозонні термомпари з діаметром занурювальної частини 4,5мм для хімічних реакторів;
- Підвісні багатозонні термометри для резервуарів зберігання;
- 3D-вимірювання температури в шарах каталізатора.

Система багатоточкового вимірювання температури TTSP може містити кілька десятків незалежних гнучких товстостінних термомпар, що вмонтовуються на одному фланці. Дана конструкція дозволяє використовувати мінімальну кількість монтажних патрубків в реакторі, скорочуючи тим самим ризик витоків води і підвищуючи цілісність апарату. Гнучкі термомпари розподіляються всередині реактора і розлучаються до потрібних точок вимірювання температури за допомогою монтажних пристосувань[6].

**6. Матричні сенсори інфрачервоного випромінювання.** Сучасні матричні сенсори інфрачервоного випромінювання використовують технологію термобатарей, технологію MEMS, яка базується на ефекті Зеебека (рис. 6). Основним елементом такої матриці є термомпара. На сьогодні матричні сенсори доступні як "теплові камери" з невеликою кількістю термомпар у сітці (рис.6). Такі сенсори використовуються в кліматичних системах автомобілів та будинків, в системах безпеки для детектування людей зберігаючи їх конфіденційність [7]. Матричні сенсори інфрачервоного випромінювання компактні, економічно ефективні, мають низьке споживання енергії.

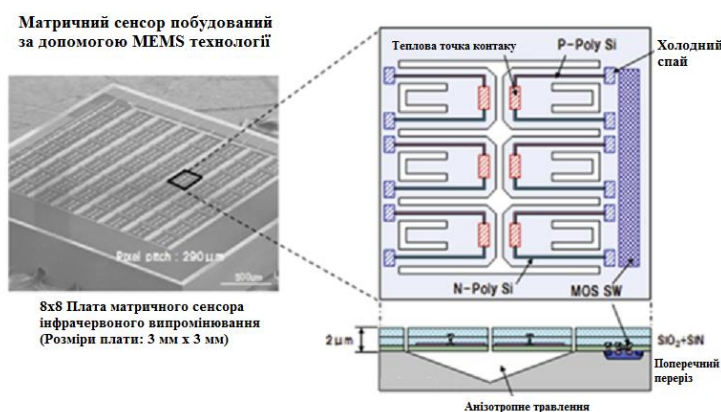


Рисунок 6 – Матричні сенсори побудовані за допомогою MEMS технології

Figure 6 - Matrix sensors built using MEMS technology

Прикладом реалізації MEMS технології є сенсор інфрачервоного випромінювання MLX90640 фірми Melexis. MLX90640 – це пристрій розміром 32x24 ІЧ сенсори, який використовують у системах протипожежної безпеки, інтелектуальних будівлях, інтелектуальному освітленні, камерах спостереження та ін.

Він має діапазон робочих температур від -40 °С до 85 °С та може вимірювати температуру об'єкта від 40 °С до 300 °С. Підтримуючи рівень точності  $\pm 1^\circ\text{C}$  у всьому діапазоні вимірювань. На відміну від альтернативного мікроболометра, сенсор не потребує регулярного повторного калібрування, що забезпечує безперервний контроль і зниження вартості системи. Melexis MLX90640 виготовляється в компактному 4-контактному корпусі TO39, який містить необхідну оптику. Матриця складається з 768 інфрачервоних сенсорів. Кожен сенсор визначається позицією рядка і стовпця як  $P_{i,j}$ . Результати вимірювання температури зчитуються через I<sup>2</sup>C – сумісний цифровий інтерфейс [8].

Матричний сенсор інфрачервоного випромінювання Melexis MLX90640 застосовується для вимірювання температури в житлових, промислових та комерційних кондиціонерах, у побутовій техніці з температурним регулюванням, у теплових датчиках комфорту в автомобільних кондиціонерах, у системах управління кондиціонерами, у мікрохвильових печах, для промислового контролю температури, для виявлення теплових витоків у будинках та виявлення присутності людини.

**Порівняння різних методів вимірювання розподілу температури**  
**Comparison of different methods of temperature distribution measurement**

Метод вимірювання	Діапазон вимірювання	Гранична похибка вимірювання	Кількість точок	Переваги	Недоліки
<b>Термографічний метод</b>	Від -50 °С до понад +2000 °С	±2 %	640x480	Простота, зручність експлуатації. Висока роздільна здатність. Не потребує контакту з об'єктом вимірювання.	Якісні камери дорогі і їх легко пошкодити. Не висока точність. Можливість вимірювання тільки температури поверхонь.
<b>Томографічний метод</b>	До 1500°С	±5°С	До 1000	Можливість розміщення вимірювальних перетворювачів на його зовнішній границі.	Складність конструкції вимірювальної системи. Великі габарити вимірювальної системи.
<b>Акустичний метод</b>	-250°С до +2500°С	±5°С	До 5	Широкий діапазон вимірюваних температур.	Виникнення методичних похибок на границі сенсора. Мала кількість точок вимірювання.
<b>Ультразвуковий метод</b>	До 2500°С	±2 %	До 10	Можливість використання елементів досліджуваного об'єкта в ролі сенсора; широкий вибір матеріалів для чутливих елементів.	Низька чутливість. Необхідність градування перед кожним використанням первинного перетворювача. Відсутність прямої залежності між температурою та часовим діапазоном.
<b>Баготозонні сенсори температури</b>	-250°С до +2500°С	±0,1 °С	До 50	Будь-який необхідний розподіл гнучких чутливих елементів всередині реактора або резервуара. Простота. Надійність.	Мала кількість точок вимірювання.
<b>Матричні сенсори інфрачервоного випромінювання</b>	-40 °С ... + 300 °С	±2 %	До 768	Компактність. Низька вартість. Простота інтегрування. Фабричне калібрування.	Складність виготовлення. Мала кількість точок вимірювання температури.

**Висновки.** Вимірювання розподілу температури на промислових та громадських об'єктах є важливим завданням. Кожен із вищезазначених методів має свої переваги та недоліки, характеристики і відповідно області застосування. Тому розвиток цих методів є актуальною задачею наукових досліджень, які дадуть змогу відкрити нові перспективи та розширити області застосування методів вимірювання розподілу температури.



## Література

1. Антоненко С.С., Колісниченко Е.В. Контроль та вимірювання параметрів рідин і газів : конспект лекцій - Суми : СумДУ, 2009. - 199 с.
2. Дорожовець М.М., Бурдега М. Томографічний метод вимірювання просторового розподілу температури за результатами вимірювань опору лінійних резистивних перетворювачів.// Вимірювальна техніка та метрологія – 2015 - № 76 – С.66-73.
3. Акустические методы измерения температуры [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://life-prog.ru/view\\_msinv.php?id=232](http://life-prog.ru/view_msinv.php?id=232)
4. Ліхновський І.С. Ультразвуковий багатозонний вимірювач температури: дисертація кандидата технічних наук – Львів, 1997.
5. Луцки Я., Буняк Л., Стадник Б. Застосування ультразвукових сенсорів. – Львів: СП «БаК», 1998. – 232 с.
6. Endress+Hauser – Многозонные датчики температуры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ru.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/Temperature-measurement-thermometers-transmitters/mnogozonnye-datchiki>
7. What's fuelling demand for IR grid sensors? [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.electronicsspecifier.com/sensors/what-s-fuelling-demand-for-ir-grid-sensors>
8. MLX90640 32x24 IR array – Short form Datasheet – Revision 3 - November 4, 2016
9. Дорожовець М. М. Томографічні вимірювання просторового розподілу фізичних величин на прикладах електричної та акустичної томографії: дисертація доктора технічних наук. – Львів, 2001. – С. 38–51.
10. Дорожовець М. М., Петровська І. Р. Дослідження методичних похибок вимірювання в електричній томографії // Вимірювальна техніка та метрологія. –2007. – № 67. – С. 13–18.
11. Засоби та методи вимірювання неелектричних величин: підручник / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, Б. І. Стадник, О. В. Івахів, Т. Г. Бойко, А. Ковальчик; за ред. Є. С. Поліщука. – Львів: Бескид Біт, 2008. – 618 с.

## References

- [1] S. Antonenko, E. Kolisnichenko, “*Kontrol ta vymiruvannia parametriv ridyn i haziv*”. Sumy, Ukraine: SumDU, 2009.
- [2] M. Dorozhovets, M. Burdeha, “Tomographic method for studying the spatial temperature distribution by the results of resistance measurements of resistive transducers”, *Measuring Equipment and Metrology*, no.76, p.66-73, 2015.
- [3] Akusticheskiye metody yzmereniya temperatury. [On-line]. Available: [http://life-prog.ru/view\\_msinv.php?id=232](http://life-prog.ru/view_msinv.php?id=232).
- [4] I. Likhnovskiy, Ultrasonic multizone temperature measuring mean, PhD dys., Lviv Polytechn. Nat. University, Ukraine, 1997.
- [5] Ya. Lutsyk, L. Buniak, B. Stadnyk, *Application of ultrasonic sensors*. Lviv, Ukraine: SP «BaK», 1998.
- [6] Endress+Hauser – Multi-zone temperature sensors. [On-line]. Available: <https://www.ru.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/Temperature-measurement-thermometers-transmitters>
- [7] What's fuelling demand for IR grid sensors? 5th Dec. 2016. [Online]. Available: <https://www.electronicsspecifier.com/sensors/what-s-fuelling-demand-for-ir-grid->
- [8] MLX90640 32x24 IR array – Short form Datasheet – Revision 3 - November 4, 2016. [Online]. Available: <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?S>.
- [9] M. Dorozhovets, “Tomographic measurements of the spatial distribution of physical quantities by examples of electrical and acoustic tomography”, Dr.Sc. Dys., Lviv Polytechn. Nat. University, Ukraine, 2001.
- [10] M. Dorozhovets, I. Petrovska, “Stydy of methodological errors of measurement in electrical tomography”, *Measuring Equipment and Metrology*, no.67, p.13–18, 2007.
- [11] Ye. Polishchuk, M. Dorozhovets, B.Stadnyk, O. Ivahiv, T. Boyko, A. Kovalchuk, “*Means and methods of measuring non-electric quantities*”, Lviv, Ukraine: Beskyd-Bit, 2008.