

## Аналіз методів вимірювання температури на основі піроелектриків

Піроелектричні матеріали знаходять широке застосування в якості сенсорних пристроїв різного призначення, детекторів і приймачів випромінювань, датчиків теплотричних приладів. Використовується головним чином їх основна властивість – будь-який вид радіації, що потрапляє на піроелектричний зразок, викликає зміну його температури і відповідну зміну поляризації[1]. При значній кількості сучасних технічних приладів, реалізованих на основі властивостей піроелектриків, зокрема енергонезалежна пам'ять, динамічна пам'ять, конденсатори, поверхневі акустичні хвилі, мікроактюатори, дефлектори[2], в даній статті хочеться зупинитися на використанні піроматеріалів так би мовити за «прямим» призначенням – перетворювачів тепла. Спробуємо проаналізувати в рамках однієї статті, наскільки це можливо, існуючі найбільш поширені методи використання піроелектриків в якості сенсорів температури.

Основною входною дією на піроелектричні перетворювачі є теплова, при декількох діях – теплова і механічна, теплова і електрична. Перелічені дії незалежно від їх фізичної природи по характеру формування електричного сигналу поділяються на генераторні і параметричні, в зв'язку з чим еквівалентну схему піроелектричного сенсора можна представити у вигляді паралельного (при вимірюванні струму) або послідовного (при вимірюванні напруги) з'єднання конденсатора і генератора (джерела струму або напруги), як показано на рис. 1.

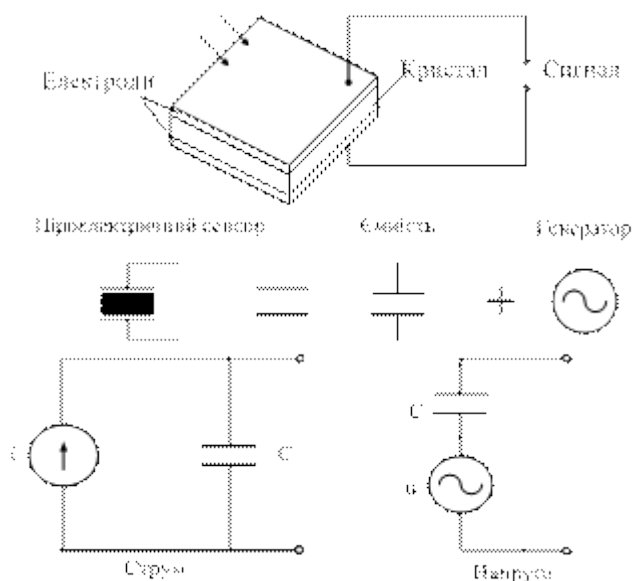


Рис. 1. Еквівалентна схема піроелектричного сенсора

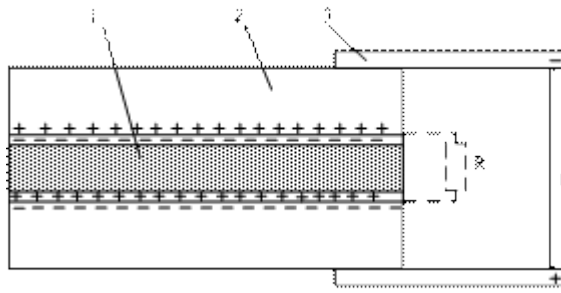


Рис. 2. Ввімкнення піроелектричного перетворювача у зовнішнє коло

В піроелектричному перетворювачі (рис. 2) полярний діелектрик використовується у вигляді пластини 1, покритої металічними електродами 2, до яких під'єднанні зовнішні виводи 3. Внаслідок електростатичної індукції в електродах і зовнішніх виводах потенціал зовнішніх виводів співпадає по знаку з приростом зв'язаного заряду на відповідній стороні піроелектрика. Піроелектрик володіє об'ємною провідністю, врахованою навантаженням витікання  $R$ [4].

Розглянемо принцип перетворення температури в електричний сигнал. Структурна схема перетворення в чутливому елементі більшості піроелектричних пристроїв (рис. 3) складається з трьох етапів[5]:

1.  $W - \Delta T$ : теплова дія  $W$  викликає зміну температури  $\Delta T$  піроелектрика.
2.  $\Delta T - \Delta Q$ : зміна температури  $\Delta T$  зумовлює появу зарядів  $\Delta Q$  на електродах піроелектрика.



Рис. 3. Структурна схема піроелектричних перетворювачів

3.  $\Delta Q - U$ : заряд  $\Delta Q$  на електродах піроелектрика створює різницю потенціалів  $U$ , значення якої залежить від власної ємності піроелектрика та імпедансу навантаження.

По функціональному призначенню перетворювачі, побудовані по цій схемі є сенсорами.

Піроелектричні сенсори, які являють собою кристали піроелектриків з приєднаними виводами, обов'язково потребують схеми підсилення вихідного сигналу  $U$ . Щоб підсилити піроелектричний сигнал для подальшої обробки використовують два типи схем підсилення: напруга на навантаженні піроелектрика (рис. 4а) і підсилення зі 100%-им від'ємним зворотнім зв'язком по заряду (рис. 4б). Вихідна напруга цієї схеми пропорційна електричному заряду на електродах піроелектрика[5].

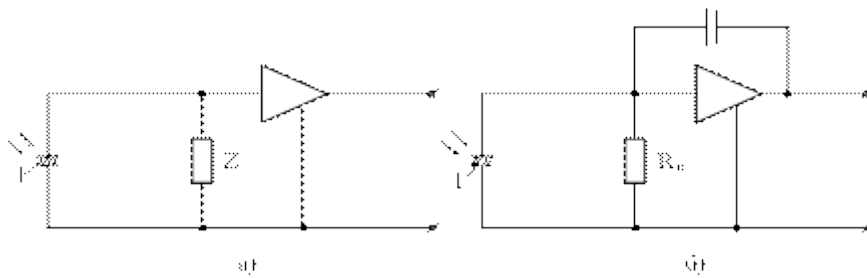


Рис. 4. Схема підсилення напруги (а) і схема з від'ємним зворотним зв'язком по заряду (б) піроелектричних сенсорів (1 – піроприймач)

Схема на основі операційного підсилювача з колом зворотного зв'язку (рис. 4б) дозволяє регулювати його коефіцієнт підсилення. Як показано в [5], використання операційного підсилювача призводить до значного підсилення чутливості піроелектричного сенсора, яка обмежується умовами теплоізоляції і конструктивними параметрами піроприймача.

Після підсилення піроелектричний сигнал потребує подальшої обробки, перетворення у зручну для аналізу форму. В сучасних системах для вимірювання температури з такими піроелектричними сенсорами обов'язковим пристроєм є аналого-цифровий перетворювач.

Крім структурної схеми перетворення в чутливому елементі поданої на рис. 3 існують інші схеми [5], серед яких для нашого огляду становить інтерес подана на рис. 5.

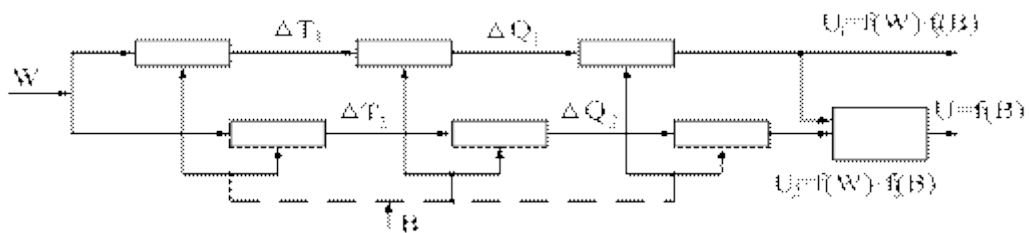


Рис. 5 – Структурна схема піроелектричних перетворювачів  
 $W, B$  – відповідно теплова і параметрична дія

В перетворювачі, побудованому по структурній схемі рис. 5 можливе однозначне визначення  $B$  при незалежній зміні  $W$ . В даній схемі теплова дія  $W$  відбувається одночасно на два чутливих елемента, які здійснюють по цій дії однакове перетворення  $f(W)$ , так що для  $B = \text{const}$   $U_1 \sim f(W)$  і  $U_2 \sim f(W)$ . Під дією  $B$  також одночасно змінюються параметри однотипних етапів обох чутливих елементів, так що  $U_1 = f(W)f_1(B)$  і  $U_2 = f(W)f_2(B)$ . Напруги  $U_1$  і  $U_2$  подаються на блок відношення, вихідна напруга якого  $U = f_1(B)/f_2(B) = f(B)$  визначаються тільки величиною  $B$ . Дана структурна схема була покладена в основу піроелектричних термометрів, які вимірюють як абсолютну температуру, так і її приріст [5]. Конструктивною основою таких перетворювачів є піроелектрична пластина з електродами, нанесеними на полярний зріз. Розглянемо спочатку піроелектричні термометри, які вимірюють малі температурні прирости.

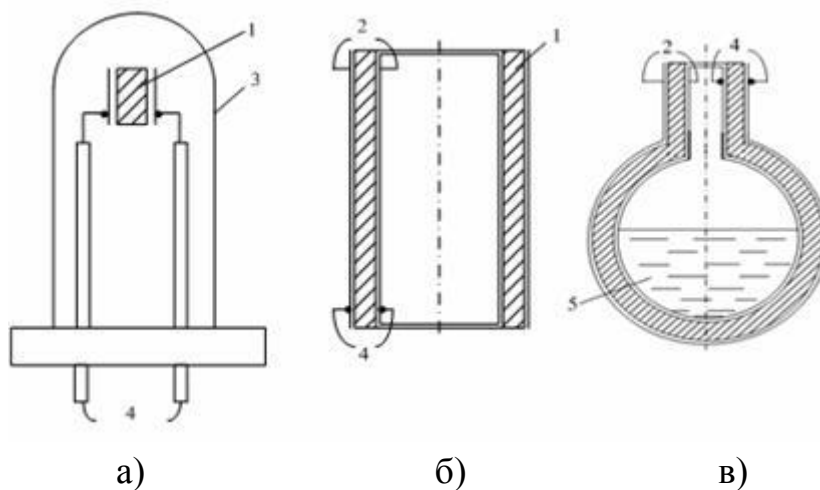


Рис. 6. Конструкції піроелектричних термометрів:

а) пластинчастий; б) порожнинчастий відкритий; в) порожнинчастий закритий; 1 – піроелектрик; 2 – електроди піроелектрика; 3 – жорстка оболонка (балон); 4 – зовнішні виводи; 5 – використовувана речовина

Такі піротермометри по конструкції чутливого елемента поділяються на дві групи (рис. 6): пластинчасті (чутливий елемент уявляє собою суцільну пластину) і порожнинчасті (чутливий елемент має вигляд замкнутої або відкритої порожнини). Чутливі елементи піротермометрів покривають жорсткою або м'якою захисною оболонкою і вводять в тепловий контакт з вимірюваним об'єктом. Рахують, що термометр суттєво не змінює початкового теплового поля. Зарядовий характер вихідного сигналу визначає і основну вимогу до схем ввімкнення піротермометра - максимально довше зберігання інформації про сумарну величину заряду, яка генерується термометром за необхідний проміжок часу. Безпосередньо вимірювати заряд доцільно статичним компенсаційним методом, схема якого зображена на рис. 7 [6,7].

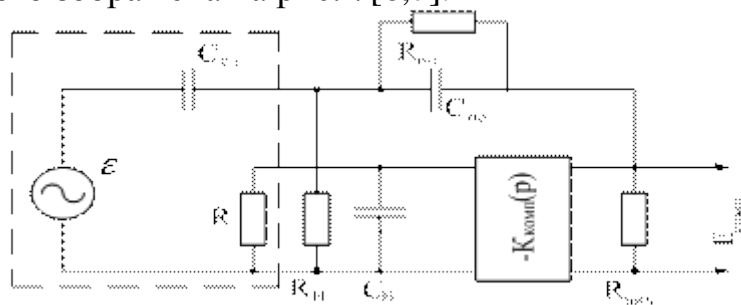


Рис. 7. Схема компенсаційного методу вимірювання заряду піротермометра

Можливості піроелектричних термометрів значно розширюються, зокрема з'являється можливість вимірювання абсолютної температури, якщо їх конструкція і схема ввімкнення виконанні по схемі перетворення рис. 5. В цьому випадку навколишня температура може розглядатися як параметрична дія  $B$  на двохелементний термометр (рис. 8). Для визначення  $B$  необхідно різне розподілення властивостей елементів по даному параметру (температурі).

Найпростіше реалізується  $\gamma^e(T)/\varepsilon(T)$  виготовленням елементів із різнорідних піроелектричних матеріалів з достатньо великим температурним коефіцієнтом залежностей  $\gamma^e(T)/\varepsilon(T)$ .

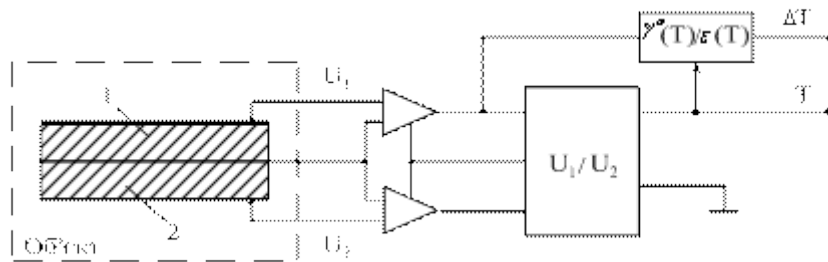
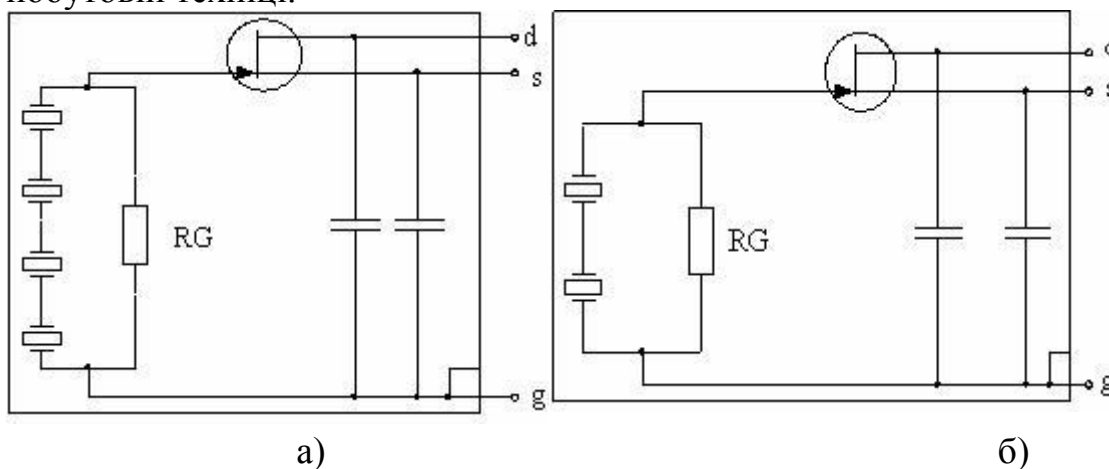


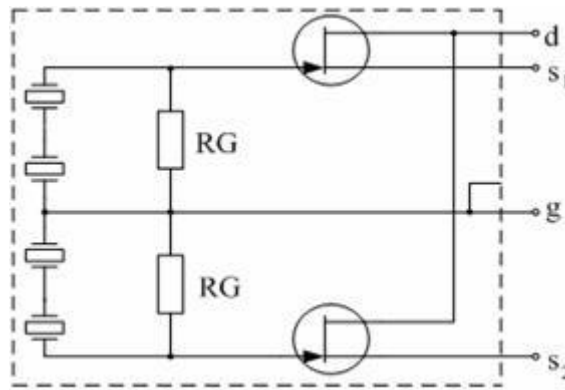
Рис. 8. Схема перетворень піроелектричної напруги елементів термометра 1, 2 – елементи піротермометра, який відрізняється температурною залежністю  $\gamma^e(T)/\varepsilon(T)$

Вимірювання температури об'єкту викликає появу напруг  $U_1$  і  $U_2$  на елементах термометра, які підсилюються електрометричними підсилювачами і подаються на блок ділення. Вихідна напруга блоку з необхідною  $T$  і використовується для керування параметричною поправкою вихідної напруги підсилювача першого елемента, яке пропорційне приросту температури[8].

Недоліком систем вимірювання температури на основі піротермометрів як видно є складність їх будови, а також неможливість проводити вимірювання у важкодоступних технічних об'єктів, об'єктів, які знаходяться під електричним потенціалом, у радіоактивному або агресивному середовищі.

Японська фірма Murata [9] розробила унікальну технологію створення елементної бази на основі піроелектричної кераміки і випускає серію інфрачервоних сенсорів IRA, які володіють високою чутливістю і надійністю. Розглянемо більш детально сенсори цієї фірми, які використовуються в побутовій техніці.





в)

Рис. 9. Піроелектричні інфрачервоні сенсори серії IRA фірми Murata

Сенсор IRA-E710ST1 (рис. 9а) містить два піроприймача і його температурний діапазон  $-40\dots70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сенсор IRA-E910ST1 (рис. 9б) містить чотири піроприймача і його температурний діапазон  $-25\dots55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . IRA-940ST1 (рис. 9в) – багатоелементний сенсор з двополярним виходом і температурним режимом  $-25\dots55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Як видно з рис. 9 для підсилення сигналів і узгодження високого вихідного опору пасивних піроприймачів з наступними функціональними вузлами вимірювальних пристроїв, в склад сенсорів вмикають додаткові схеми попередньої обробки. Найбільш часто застосовують однокаскадні та двохкаскадні підсилювачі на польових транзисторах (рис. 9), які володіють добрим узгодженням по високим значенням вхідного і вихідного опорів.

З метою зниження рівня ВЧ шумів між електродами сенсора і загальним виводом (корпусом) вмикають, як показано на рис. 9а,б блокувальні конденсатори малої ємності, які не впливають на НЧ корисний сигнал, але шунтують наведені завади.

Багатоелементні піроелектричні сенсори з двополярним виходом використовують для обробки сигналу два симетричні каскади на польових транзисторах, як показано на рис. 9в. В цьому випадку актуальною стає проблема підбору ідентичних параметрів кожного плеча схеми. Розузгодження підсилювача призводить до появи викривлень у вихідному сигналі сенсора. Через неможливість усунення технологічного розкиду характеристик транзисторів, вирівнювання режимів роботи підсилювальної схеми здійснюється підбіркою або підгонкою резисторів RG (рис. 9в).

В даній статті хочеться виділити і розглянути інтегровані датчики потужності випромінювань (ДПВ) на основі комбінованих твердотільних структур[10]. Дані ДПВ використовуються як сенсори температури в системі автоматизованого керування і контролю параметрів печі ІЧ-сушіння виробів електронної техніки[11]. В основі ДПВ лежить біполярний транзистор з польовим керуванням (БТПК). Розглянемо будову і принцип роботи ДПВ більш детально. Узагальнена конструкція ДПВ наведено на рис. 10.

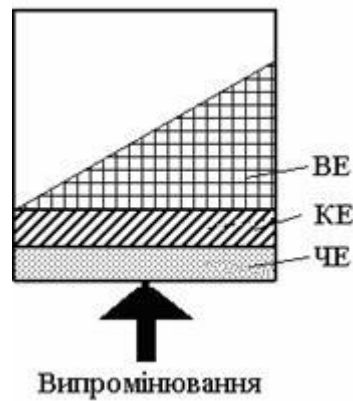
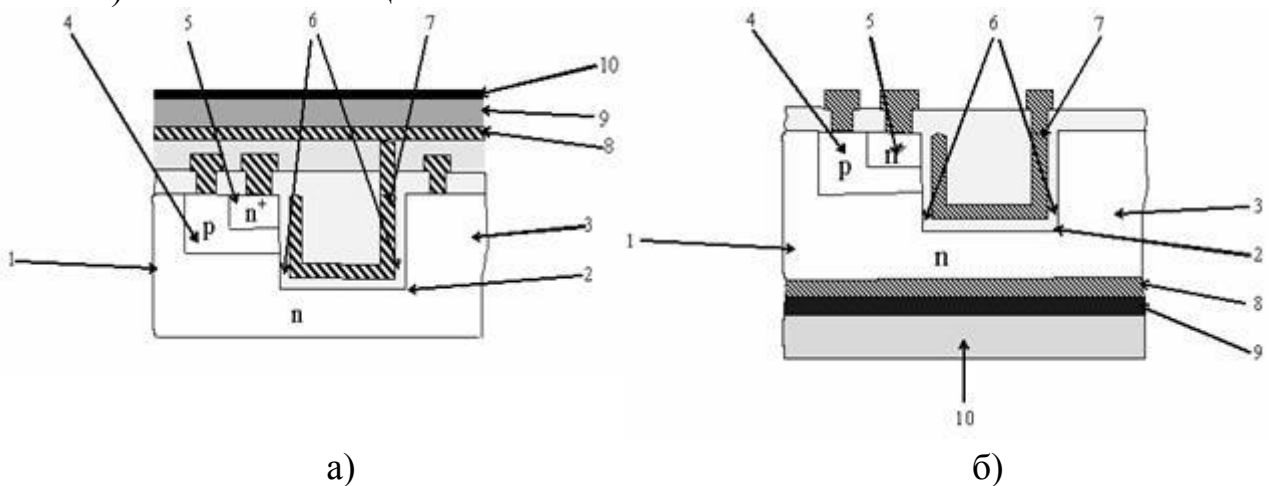


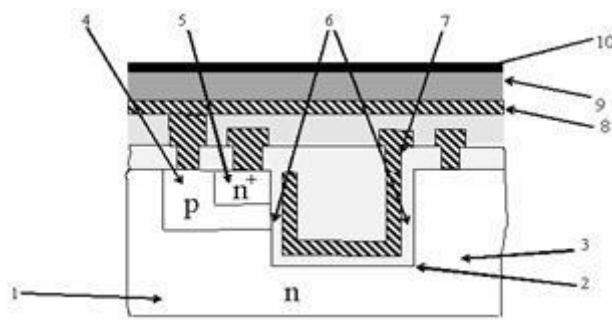
Рис. 10. Узагальнена схема ДПВ

ДПВ містять чутливий елемент (ЧЕ) – поглинач випромінювань, керуючий елемент (КЕ) – піроелектричний перетворювач і виконавчий елемент (ВЕ) – БТПК. Робота ДПВ супроводжується зміною вихідного параметра ВЕ в результаті зміни потенціалу на одному з електродів БТПК, електрично з'єднаному з піроелектриком. Нагрівання піроелектрика відбувається за рахунок перетворення потужності сигналу в тепло за допомогою ЧЕ[10]. Розроблені структури ДПВ, наведені на рис. 11[10], відповідно до яких вимірювальний перетворювач містить підкладку 1, із кремнію n-типу з орієнтацією (100), на якій виконана ізопланарна транзисторна структура з бічною  $\text{SiO}_2$  –ізоляцією, у якій за допомогою анізотропного травлення виконаний паз 2, дно якого розташоване в області колектора 3, а області бази 4 і емітера 5 обмежені однією зі стінок паза, на стінках паза сформований шар  $\text{SiO}_2$  - 6 і додатковий польовий електрод – затвор 7. На колекторний контакт 8 послідовно наносяться шари піроелектрика 9 і металовуглицевого композита 10, що здійснюють перетворення потужності сигналу.

Розроблено [10] кілька видів конструктивно-технологічного виконання ДПВ (рис. 11):

- а) з ЧЕ і КЕ в ланцюзі колектора БТПК;
- б) з ЧЕ і КЕ в ланцюзі затвора БТПК;
- в) з ЧЕ і КЕ в ланцюзі бази БТПК.





в)

Рис. 11. Варіанти структур ДПВ

Вихідний сигнал даних ДПВ у вигляді електричного струму, що зумовлює збільшення похибки вимірювань та знижує економічність систем для вимірювання температури на їх основі.

На основі огляду методів вимірювання температури на основі піроелектриків поданих у даній статті можна зробити загальний висновок про складність вимірювання, а якщо проаналізувати більш детально, то підсумуємо наступне:

- 1) низька точність вимірювання, яка падає після кожної ланки обробки вихідного сигналу (який вже йде з похибкою зумовленою особливостями будови піроматеріалів і додатковими паразитними фізичними ефектами, окрім піроефекту), оскільки кожна схема, будь-то підсилення, обробки має власну похибку;
- 2) низька економічність пристрою, зумовлена наявністю схем підсилення, АЦП;
- 3) низька завадостійкість;
- 4) неможливість передачі інформації на відстань.

Як вихід з цих проблем і альтернативу вже існуючим і широко використовуваним в техніці методам вимірювання температури на основі піроелектриків автори статті пропонують власний метод на основі розроблених ними і поки що не впроваджених у виробництво мікроелектронних піроелектричних сенсорів з частотним виходом. В основі даних сенсорів вимірювання температури через теплову потужність лежить використання в основі автогенераторів, описаних в [12], а також узагальненої схеми, поданої на рис. 10. Частотний вихід мікроелектронних сенсорів дозволить подолати окреслені вище чотири проблеми існуючих систем вимірювання температури, а можливість безконтактного вимірювання ними температури дозволить проводити вимірювання у важкодоступних технічних об'єктів, об'єктів, які знаходяться під електричним потенціалом, у радіоактивному або агресивному середовищі.



## Література

1. Струков Б.А. Пироэлектрические материалы: свойства и применения // Соросовский образовательный журнал. 1998. №5. - С. 96-104
2. Сигов А.С. Сегнетоэлектрические тонкие пленки в микроэлектронике // Соросовский образовательный журнал. 1996. №10. - С. 83-91
3. Виглеб Т. Датчики. – М.: Мир, 1989. – С. 196
4. Гаврилова Н.Д., Данилычева М.Н., Новик В.К. Пироэлектричество, - М.: Сов. рад., 1989. – С. 154
5. Новик В.К., Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. Пироэлектрические преобразователи – М.: Советское радио, 1979. – С. 176
6. Сонин А.С., Струков Б.А. Введение в сегнетоэлектричество. М., «Высшая школа», 1970. – С. 162
7. Новик В.К., Гаврилова Н.Д., Ройтберг М.Б., Рабинович А.З. Методы обнаружения и исследования пироэффекта. – «Электронная техника. Серия 14. Материалы», 1969, выпуск 1. - С. 167-173.
8. Иванов Н.Р., Пельц С.Д., Шувалов Л.А., Чингина Ю.А. Пироэффект в тригидроселените лития. – В книге: Материалы семинара МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, май 1972, М., О-во «Знание», 1972. - С. 111-113.
9. [www.murata.com/catalog/s21e5.pdf](http://www.murata.com/catalog/s21e5.pdf)
10. Костенко В.Л., Швец Е.Я., Киселев Е.Н., Омельчук Н.А. Измерительные преобразователи на основе комбинированных твердотельных структур – Запорожье, издательство ЗГИА, 2001. - С. 101
11. Костенко В.Л., Швец Е.Я., Максименюк А.В., Киселев Е.Н. Особенности построения корпоративных сетей интеллектуальных датчиков параметров технологических процессов/ Металлургия (сб. научных трудов)/ отв. ред. Колесник Н.Ф., Колобов Г.А. – Запорожье: ЗГИА, 2003. – выпуск 8 – С. 146-148.
12. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000 – С. 303