

Державний університет "Львівська політехніка"

**ЛІХНОВСЬКИЙ Ігор Степанович**

УДК 536.5:534-8

**УЛЬТРАЗВУКОВИЙ БАГАТОЗОННИЙ  
ВИМІРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ**

*Спеціальність 05.11.04- прилади та методи вимірювання  
теплових величин*

**АВТОРЕФЕРАТ**

ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ НАУКОВОГО СТУПЕНЯ  
КАНДИДАТА ТЕХНІЧНИХ НАУК

**ЛЬВІВ -- 1997**



Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Державному університеті "Львівська політехніка"  
Міністерства освіти України.

**Науковий керівник -**

доктор технічних наук, професор,  
заслужений винахідник України

**Стадник Богдан Іванович.**

ДУ "Львівська політехніка", зав. каф.  
"Інформаційно-вимірювальна техніка"

**Офіційні опоненти :**

1. Доктор технічних наук, професор,

**Назаренко Леонід Андрійович.**

ДНВО "Метрологія" ( м. Харків), зав.відділом.

2. Кандидат фізико-математичних наук, доцент,

**Леновенко Анатолій Михайлович.**

Львівський державний університет ім. І. Франка,  
зав. лабораторією радіоелектронних приладів.

**Провідна організація - НВО АТ "Термоприлад", відділення  
первинних перетворювачів, м.Львів.**

Захист відбудеться "26" вересня 1997р. о 14 год. в ауд.226 головного корпусу на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.06.11 у Державному університеті "Львівська політехніка" (290646, Львів-13, вул.С.Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (290013, Львів-13, вул.Професорська,1).

Автореферат розісланий "22" 08 1997р.

*Вчений секретар спеціалізованої*

*вченої ради, д.т.н.*

**Луцик Я.Т.**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** 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, Лінновс та ін.) виявили низку переваг перед традиційними засобами вимірювання температури. До них можна віднести наступне:

- можливість використання елементів досліджуваного об'єкта в ролі давача;
- можливість створення на базі одного чутливого елемента багатозонного термометра для вимірювання аксиального розподілу температури;
- широкий вибір матеріалів для чутливих елементів, до яких входять окрім металів та їх сплавів - кераміка, металокераміка, газу і рідини.

Перспективи застосування ультразвукових термометрів наочно проявилися при їх випробовуваннях 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 енергетичного ресурсозбереження і пошуком альтернативи термометрувачам на основі металів платинової групи.

**Загальний стан проблеми.** Створення ультразвукових імпульсних термометрів для вимірювання розподілу середніх і високих температур - складне завдання, що вимагає залучення результатів останніх досліджень в галузі матеріалознавства, акустики, електроніки та приладобудування і на даному

етапі, до певного ступеня, гальмується недостатньою глибиною дослідженості питань, які стосуються теоретичних засад структурної побудови, проектування, технології виготовлення та метрологічного забезпечення таких приладів.

**Мета роботи.** Метою дисертаційної роботи є теоретичні і експериментальні дослідження та створення ультразвукового багатозонного імпульсного термометра з підвищеною швидкодією та автоматизованим процесом вимірювання.

**Завдання досліджень.** У відповідності до поставленої мети завданнями досліджень були:

-пошук оптимальних шляхів побудови багатозонних ультразвукових термометрів;

-експериментальні дослідження матеріалів з метою визначення перспектив їх використання в ультразвуковій термометрії;

-аналіз, синтез та оптимізація структурних схем імпульсних багатозонних ультразвукових термометрів;

-проведення теоретичних та експериментальних досліджень різних конструкцій чутливих елементів імпульсного ультразвукового багатозонного термометра;

-проведення теоретичних та експериментальних досліджень для оптимізації конструкції електроакустичного перетворювача імпульсного ультразвукового термометра;

-розробка рекомендацій щодо процедури градуювання імпульсного ультразвукового термометра.

**Методи досліджень.** Для теоретичних узагальнень і лабораторних досліджень окремих складових ультразвукових багатозонних імпульсних термометрів, їх побудови і оптимізації використовувались теоретичні та експериментальні методи досліджень, що базуються на загальній теорії теплофізики, акустики та вимірювань, а також певних розділів теорії електромеханічних аналогій, радіотехнічних кіл та фізики твердого тіла.

**Наукова новизна** роботи.

1. Розроблено оптимізовану структуру термометра, яка дозволила підвищити його швидкодію і повністю автоматизувати процес вимірювання.

2. Одержано температурні залежності пружно-в'язких властивостей матеріалів (вольфрам, молібден, сплави на їх основі, нержавіюча сталь ХН45Ю), які можуть використовуватися для виготовлення чутливих елементів імпульсних термометрів.

3. Запропоновано методику розрахунку багатозонного чутливого елемента.

4. Розроблено та експериментально підтверджено методику градуювання багатозонних імпульсних термометрів.

**Достовірність результатів.** Достовірність наукових результатів підтверджується співпадінням результатів теоретичних викладок та математичного моделювання з результатами експериментальних досліджень створених дослідних зразків імпульсних багатозонних термометрів.

**Практична цінність роботи:**

- розроблена і апробована математична модель формування ехосигналів, що дозволяє створювати чутливі елементи з прогнозованими характеристиками;

- сформульовано рекомендації щодо практичної реалізації спеціалізованих магнітострикційних перетворювачів для імпульсних термометрів;

- розроблено конструкції багатозонних чутливих елементів термометра;

- створено конструкції та експериментальні зразки багатозонних ультразвукових імпульсних термометрів для вимірювання аксиального розподілу температури.

**Реалізація роботи.** На основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів створені експериментальні зразки багатозонних ультразвукових імпульсних термометрів, які пройшли випробування в лабораторних та промислових умовах. Зокрема, при безпосередній участі автора були сконструйовані експериментальні зразки імпульсних термометрів з 5-тизонним чутливим елементом, які пройшли успішні випробування в АТ "Електротермометрія" (м. Луцьк) та на Дніпровському металургійному комбінаті (м. Дніпродзержинськ). Один експериментальний зразок термометра переданий АТ "Електротермометрія" для подальших випробувань.

Теоретичні результати і практичні рекомендації роботи використовувались і використовуються в НДР та ДКР Державного університету "Львівська політехніка", НВО "Термоприлад" (м. Львів) та АТ "Електротермометрія" при створенні перспективних перетворювачів середніх та високих температур.

**Особистий внесок автора.** Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень, розробка схемних рішень вторинного приладу термометра виконані автором самостійно. Аналіз результатів окремих досліджень проведено в співавторстві згідно наведеного списку літератури.

**Апробація роботи.** Основні положення роботи доповідались на 4 міжнародних, на 5 всесоюзних та республіканських науково-технічних конференціях і симпозиумах.

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 26 робіт,

із них 5 авторських свідоцтв на винаходи.

**Структура роботи.** Дисертаційна робота викладена на 143 сторінках основного друкованого тексту, містить 72 рисунки та 6 таблиць і складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, літератури з 77 найменувань та додатків на 16 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині зазначена актуальність проведених досліджень, сформульована мета і показані наукова новизна та практичні результати, отримані в роботі.

В першому розділі зроблено аналітичний огляд існуючих засобів вимірювання розподілу температури. Зокрема, аналітично розглянуті традиційні методи вимірювання розподілу температури за допомогою терморезисторів та термопар, а також перспективи, переваги та недоліки ультразвукових резонансних та імпульсних методів.

На основі огляду методів вимірювання розподілу високих температур та відомих варіантів їх практичної реалізації зроблений висновок, що ультразвуковий імпульсний метод, в якому застосовується чутливий елемент у вигляді стрижня з штучно зформованими елементами відбивання сигналу, на сучасному етапі є найбільш перспективним напрямком у вирішенні проблеми вимірювання розподілу температур. Чутливий елемент імпульсного термометра має порівняно просту конструкцію і в той же час дає можливість контролювати чи вимірювати температуру (або її усереднене значення) в багатьох точках вздовж осі досліджуваного об'єкту. Згаданий імпульсний термометр має широкі можливості щодо вибору матеріалу для виготовлення чутливого елемента (метали, кераміка, склоподібні матеріали та ін.) і, як наслідок, може застосовуватися в об'єктах з особливо складними умовами експлуатації (хімічно агресивне середовище, наявність іонізуючого випромінювання, електромагнітного поля).

У другому розділі розглядаються фізичні основи та проблеми практичної реалізації ультразвукового імпульсного методу вимірювання температури та її розподілу. Виконано теоретичний аналіз з використанням математичного моделювання конструкції первинного багатозонного перетворювача та представлено результати експериментів на підтвердження теоретичних висновків.

Для створення ультразвукових коливань та їх ресстрації рекомендовано застосовувати магнітострикційні електроакустичні перетворювачі, які

забезпечують перетворення електричних сигналів в акустичні і навпаки до частот 200 кГц. Резонансна частота  $F_0$  сердечників магнітострикційного перетворювача у вигляді стрижнів постійного перерізу визначалася за формулою: 
$$F_0 = \frac{n}{2 \cdot l_e} \cdot v$$
 де  $n$ - номер гармоніки,  $l_e$ - ефективна довжина збуджуючої котушки,  $v$  - швидкість поширення звуку в матеріалі осердя. Оскільки розраховане і реальне значення резонансної частот  $F_0$ , переважно відрізняються за рахунок різниці між ефективною довжиною котушки  $l_e$  (яку при розрахунку приймають рівною фізичній довжині), та її ефективною довжиною, передбачено каркас збуджуючої котушки охоплювати магнітним екраном. Для зменшення втрат через струми Фуко осердя перетворювачів доцільно виконувати з тонких стрічок, пластин або трубок, попередньо покритих електроізоляційним матеріалом. При використанні нікелю таким матеріалом може бути плівка оксиду нікелю, яка отримується з допомогою термічної обробки: нагріву у вакуумі при  $1000^\circ\text{C}$  з наступним нагрівом на повітрі при  $700^\circ\text{C}$  протягом 20-30 хвилин. Запропоновано і досліджено варіант виготовлення магнітострикційного осердя з тонкої термічно обробленої нікелевої фольги, яка скручена в спіраль. Таке виконання дозволило підняти точність вимірювання температури за рахунок збільшення і стабілізації коефіцієнта відношення сигнал/шум і зменшення впливу вихрових струмів. Крім того, така конструкція спростила узгодження акустичних імпедансів перетворювача і акустичної лінії зв'язку за рахунок можливості задавати еквівалентний переріз перетворювача шляхом зміни числа витків спіралі.

Досліджено вплив форми та амплітуди зондуючого сигналу на точність вимірювання температури імпульсним термометром. З врахуванням того, що акустичний сигнал поширюється вздовж осі магнітострикційного осердя в обидві сторони, а магнітострикційний перетворювач в більшості випадків навантажений лінією зв'язку з однієї сторони, в роботі проаналізована загальна картина формування зондуючого сигналу. Аналіз та математичне моделювання дозволило зробити висновок, що найкращий результат при формуванні зондуючого сигналу можна отримати при реалізації магнітострикційного електроакустичного перетворювача при відсутності навантаження на вільному кінці осердя за варіантом, де довжина котушки збудження становить 75-80% від довжини осердя, а сама котушка розташована симетрично відносно середини магнітострикційного осердя.

Ультразвуковий багатозонний імпульсний термометр працює переважно в режимі відбивання і вимірює часовий інтервал  $\tau$  між парою відбитих сигналів

від початку та кінця вибраної вимірювальної зони  $\tau = \frac{2 \cdot L}{v}$  де

$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  - швидкість поширення акустичних коливань в матеріалі,  $L$  - довжина вимірювальної зони,  $E$ -модуль Юнга,  $\rho$ - питома густина. При проведенні теоретичних розрахунків становище до певної міри ускладнюється тим, що на даний час немає загальних співвідношень, які би в явній формі зв'язували значення температури, констант пружності та швидкості поширення ультразвукових хвиль. Тому реальним виходом з цього є індивідуальне експериментальне дослідження залежності "час-температура" для конкретного матеріалу, який вбачається перспективним для виготовлення чутливого елемента.

В роботі розглядалися чутливі елементи, які виготовляються з порівняно тонкого стрижня, а елементи відбивання формуються механічною обробкою у вигляді отворів, згинів, фрезерованих або проточених надрізів та потовщень (рис.1). На підставі попереднього аналізу рекомендовано застосовувати поздовжні хвилі та вузли відбивання, які виконані у вигляді вирізаних сегментів (рис.1,д).



Рис.1. Варіанти виконання чутливих елементів ультразвукових імпульсних термометрів

Такий варіант найбільш просто реалізується, враховуючи особливості технології виготовлення елементів з надтвердих матеріалів. При розрахунках параметрів елементів відбивання застосовувалися співвідношення для коефіцієнтів відбивання  $r$  та проходження  $t$  акустичного сигналу  $r = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}$ ;

$t = \frac{2\varepsilon}{\varepsilon + 1} = 1 + r$ , де  $\varepsilon = \rho_2 v_2 S_2 / \rho_1 v_1 S_1$  - відношення акустичних імпедансів елемента відбивання та стрижня.

Проаналізовано формування, проходження та відбивання акустичного сигналу від елементів відбивання багатозонного чутливого елемента за умови рівності амплітуд, а також за умови рівності коефіцієнтів відбивання при наявності імпульсів багатократного відбивання. В результаті встановлено, що для зменшення впливу імпульсів багатократних відбивань значення коефіцієнту відбивання  $r$  слід вибирати в межах  $0.08 < r < 0.13$ . Тоді для визначення амплітуди робочих ехосигналів для будь-якої кількості елементів відбивання і за умови рівності всіх коефіцієнтів відбивання, можна застосувати вираз:

$$A_n = r t^{2n} + \frac{n \cdot (n-1)}{2} r^3 t^{2(n-1)};$$

а для останнього ехосигналу відбитого від торця чутливого елемента:

$$A_m = -t^{2m} + \frac{m \cdot (m-1)}{2} r^3 t^{2(m-1)},$$

де індекс  $m$  відноситься до останнього ехосигналу.

Математичне моделювання процесу проходження та відбивання акустичного сигналу на елементі відбивання дало можливість дослідити вплив геометричних розмірів останнього на форму і амплітуду ехосигналу. З врахуванням виразів для

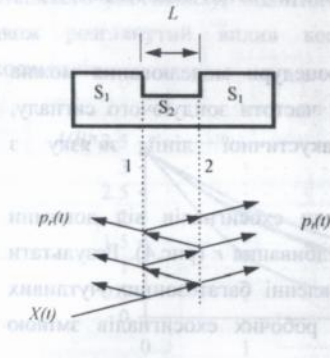


Рис.2. Відбивання та проходження сигналу на елементі відбивання.

коефіцієнтів відбивання  $r$  та проходження  $t$  на границях елемента відбивання, а також співвідношень для  $r_2 = -r_1$  та  $t_2 = 1 - r_1$  можна записати вирази для сигналів, що пройшли  $p_t(t)$  та відбилися  $p_r(t)$  (рис.2):

$$p_r(t) = r_1 X(t) - r_1 (1 - r_1^2) X(t-s) + r_1^3 (1 - r_1^2) X(t-2s)$$

$$p_t(t) = (1 - r_1^2) X(t) + r_1^2 (1 - r_1^2) X(t-s) + r_1^4 (1 - r_1^2) X(t-2s)$$

де  $X(t)$  - падаючий на елемент відбивання акустичний сигнал,  $s = 2L/v$  - час подвійного проходження сигналу в елементі відбивання. З врахуванням того, що  $r \approx 0.1$ , в останніх виразах можна знехтувати членами, які містять  $r_1$  в третій і вищих степенях.

Результати математичного моделювання для багатозонного чутливого елемента та реальні ехосигнали представлені на рис.3.

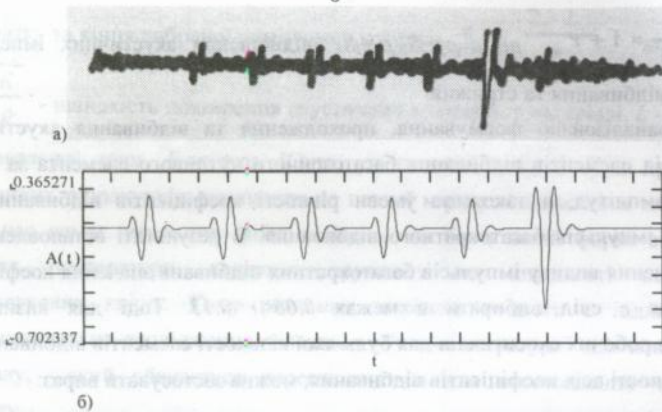


Рис.3. Реальні ехосигнали (а) та ехосигнали, отримані в результаті моделювання (б).

За допомогою використаної автором процедури моделювання можна оцінити вплив на параметри ехосигналів зміни частоти зондуючого сигналу, швидкості поширення, якості з'єднання акустичної лінії зв'язку з магніострикційним перетворювачем.

Зокрема, досліджена залежність амплітуди ехосигналів від довжини елемента відбивання при різних коефіцієнтах відбивання  $r$  (рис.4). Результати цих досліджень дають можливість при виготовленні багатозонних чутливих елементів коректувати амплітуду відповідних робочих ехосигналів зміною довжини елемента відбивання.

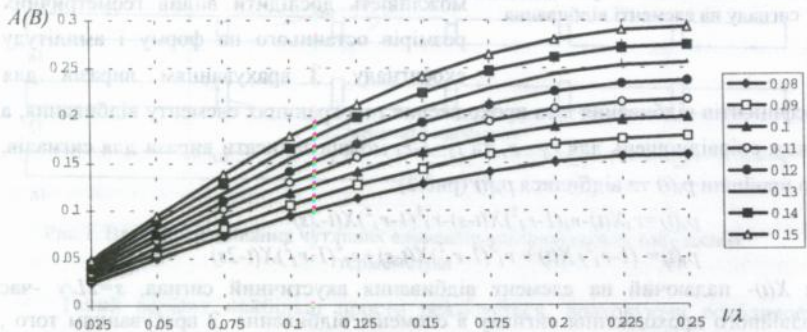


Рис.4. Залежність амплітуди ехосигналу від співвідношення довжини елемента відбивання до довжини хвилі зондуючого сигналу.

Передача акустичного сигналу від перетворювача до чутливого елемента здійснюється за допомогою акустичної лінії зв'язку, яка повинна забезпечувати мінімальне спотворення та мінімальне згасання акустичного сигналу на всій її довжині, а також узгоджений акустичний імпеданс з перетворювачем. Для передачі сигналів з мінімальними спотвореннями необхідно звести до мінімуму вплив бокової поверхні акустичної лінії зв'язку на розподіл ультразвукових хвиль, який веде до дисперсії швидкості звуку. Неспотворена передача акустичного сигналу по довгій лінії зв'язку реально забезпечується при виконанні умови для поздовжніх коливань  $d \leq 0.2 \cdot \lambda$  де  $d$  - діаметр лінії зв'язку,  $\lambda$  - довжина акустичної хвилі.

В роботі запропоновано метод оцінки узгодження акустичної лінії зв'язку з магнітострикційним перетворювачем за результатами аналізу форми останнього ехосигналу, відбитого від торця чутливого елемента (рис.3,а), а також розглянутий вплив коефіцієнта згасання (рис.5) на параметри ехосигналів.

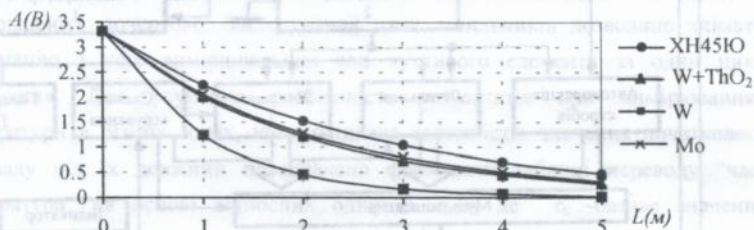


Рис.5. Залежність амплітуди акустичного сигналу від довжини акустичної лінії зв'язку

В третьому розділі запропоновано конкретні схемні рішення ультразвукового імпульсного багатозонного термометра. Проведений детальний аналіз приймально-передавального тракту з позицій забезпечення мінімальних спотворень форми ехо-сигналів та досягнення оптимального співвідношення сигнал/шум. Представлено експериментальні результати дослідження впливу індуктивностей зондуючої та приймальної котушок на зазначені фактори. Для мінімізації впливу з'єднувального кабелю між перетворювачем і вторинним приладом передбачено генератор зондуючих сигналів та підсилювач електричних ехосигналів конструктивно розташовувати безпосередньо біля магнітострикційного перетворювача.

Враховуючи, що процес опрацювання інформаційного сигналу в ультразвуковому імпульсному багатозонному термометрі є складною

процедурою і містить велику кількість операцій, в основу структурної схеми покладено використання мікропроцесора. Це дозволило, на відміну від відомих експериментальних зразків імпульсних термометрів, провести повну автоматизацію процесу вимірювання, а саме таких основних режимів:

- початкового пошуку ехосигналів;
- вимірювання часових інтервалів;
- автокорекції розташування строб-імпульсів;
- виводу інформації.

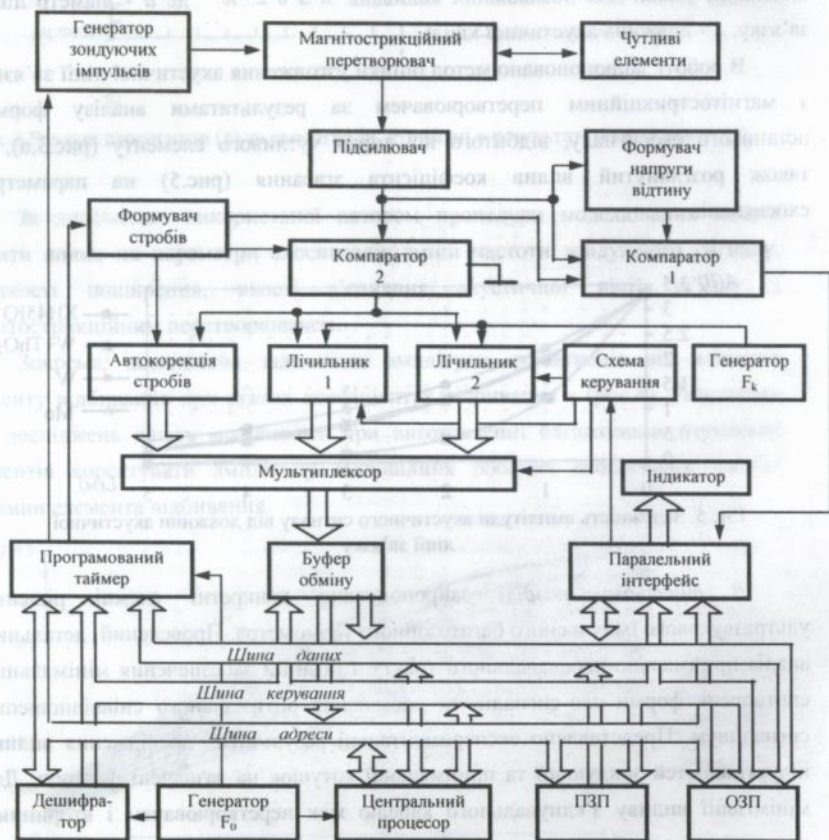


Рис.6. Структурна схема імпульсного багатозонного термометра

Структурна схема імпульсного багатозонного термометра наведена на рис.6. Вона реалізує два основних етапи роботи. Перший -це пошук робочих ехосигналів та визначення кодів затримки появи строб-імпульсів відносно

зондуючого сигналу. Другий - це вимірювання міжімпульсних часових інтервалів, корекція строб-імпульсів відносно позицій ехосигналів, обробка отриманої інформації та виведення результатів вимірювань на індикатори.

Для вирішення питань щодо повної автоматизації приладу були розроблені схемні рішення формувача напруги відтину та автокорекції стробів. В запропонованому в роботі формувачі напруги відтину опорна напруга для компаратора 1 (рис.6) формується з аналогової послідовності ехосигналів, а це дозволяє, на відміну від відомих схем з постійною чи пропорційною напругою відтину, проводити селекцію робочих ехосигналів в широкому динамічному діапазоні змін амплітуди, і, як наслідок, працювати з довгими акустичними лініями зв'язку та підняти верхню границю діапазону вимірюваних температур. Детально пророблені питання по зменшенню похибки вимірювання часових інтервалів та підвищення швидкодії приладу. Зокрема, для зменшення похибки вимірювання за рахунок напруги відтину було запропоновано формувати міжімпульсний часовий інтервал в моменти переходу ехосигналу через нуль (компаратор 2), а для підвищення швидкодії - ввести в схему два лічильники, які працюють по чергово. Застосування двох лічильників дозволило знімати інформацію з усіх вимірювальних зон чутливого елемента за один цикл зондування. Для усунення розбіжності результатів при вимірюваннях температури в різних зонах, що викликана залежністю значення початкового інтервалу від їх довжини передбачено формувати таблиці переведу "час-температура" на основі відносних одиниць  $\tau_B/\tau_X$  де  $\tau_B$  - базове значення міжімпульсного часового інтервалу при заданій температурі,  $\tau_X$  - виміряне значення часового інтервалу при температурі  $T_X$ . Такий підхід усунув складову похибки, зумовлену залежністю результатів вимірювання від неідентичності довжин вимірювальних зон.

У відповідності до структурної схеми (рис.6) та запропонованого алгоритму її роботи були створені експериментальні зразки багатозонних імпульсних термометрів, які характеризуються наступними параметрами:

діапазон вимірюваних температур, °C	500-2500
кількість зон, в яких вимірюється температура	5
макс. абсолютна похибка вимірювання, °C	<15
довжина однієї зони, мм	50-150
довжина акустичної лінії зв'язку, м	1-5
макс. довжина електричного з'єднувального кабелю, м	15
виконання	стаціонарне
живлення	220 V; 50 Hz

З допомогою створеного приладу були проведені експериментальні дослідження температурної залежності пружних характеристик таких матеріалів, як молібден, нержавіюча сталь, вольфрам, сплави вольфраму з 2% оксиду торію і ВР-20.

В четвертому розділі проведені структуризація та детальний аналіз чинників, які впливають на похибку вимірювання, представлені основні співвідношення для розрахунку складових похибки вимірювання, показані шляхи їх зменшення.

Співвідношення для розрахунку похибки було отримано із наближеного виразу  $T = T_0 - \frac{2}{c} \ln \frac{t}{t_0}$ , де  $T_0$ ,  $t_0$  - початкові значення температури і часового інтервалу,  $c$  - сума температурних коефіцієнтів розширення і модуля пружності. Вираз для відносної похибки був отриманий у вигляді

$$\delta_T = \frac{\Delta T_0}{T} \delta_{T_0} - \frac{2}{cT} (\delta_t - \delta_{t_0}) + \delta_{t, \delta}$$

де  $\delta_t$ ,  $\delta_{t_0}$  - похибки вимірювання відповідних часових інтервалів,  $\delta_{об}$  - похибка обчислення  $T$ . Наприклад, для вольфрамового чутливого елемента  $\delta \approx 4.9 \cdot 10^{-2} + \delta / 57.5 \cdot 10^{-3}$ , де  $\delta_t$  - складова, обумовлена впливом завад.

Також була промодельована ситуація, при якій чутливий елемент встановлений в каналі і обтікається газовим потоком. Ця задача була вирішена у вигляді програми, в якій передбачене застосування таких матеріалів, як вольфрам, молібден, нержавіюча сталь ХН45Ю.

Сформульовані методичні рекомендації щодо реалізації процедури перевірки багатозонних імпульсних термометрів. Зокрема, при температурах вищих за  $900^\circ\text{C}$  для чутливого елемента із електропровідних матеріалів рекомендовано проводити нагрів останнього струмом, а температуру нагрітої ділянки контролювати зразковим пірометром типу ЭОП-66 (або аналогічним). Оскільки імпульсний термометр визначає інтегральну температуру вздовж вимірювальної зони, то для зменшення методичної похибки запропоновано сканувати пірометром всю контрольовану ділянку, а результати вимірювань усереднювати.

## ВИСНОВКИ

1. Показано, що ультразвуковий імпульсний метод, в якому застосовується чутливий елемент у вигляді стрижня з штучно сформованими елементами відбивання, є перспективним для створення багатозонних термометрів для складних умов експлуатації.

2. Для забезпечення необхідної інтенсивності акустичного сигналу та

узгодженості акустичних імпедансів між перетворювачем та лінією зв'язку запропоновано застосовувати магнітострикційні перетворювачі з осердям, виготовленим у формі спіралі.

3. Математично промодельовані характеристики зондуючого акустичного сигналу електроакустичного перетворювача, що дозволило детермінувати його характеристики та мінімізувати вплив паразитних параметрів каналу перетворення на точність вимірювання температури.

4.3 метою оптимізації конструкції багатозонного стрижневого чутливого елемента рекомендовано елементи відбивання виконувати у формі вирізаних сегментів.

5. За результатами імітаційного моделювання процесу відбивання акустичного сигналу від границь зон чутливого елемента встановлено оптимальні межі діапазону значень коефіцієнта відбивання, що зменшило вплив ревербераційних імпульсів на точність вимірювання температури.

6. На основі аналізу та синтезу схем імпульсних багатозонних термометрів розроблено структуру приладу, яка забезпечує повну автоматизацію процесу вимірювання, підвищення його швидкодії та завадостійкості.

7. Виконані комплексні експериментальні дослідження матеріалів, перспективних для виготовлення чутливих елементів імпульсних термометрів.

8. На підставі аналізу чинників, що впливають на точність вимірювання, та з врахуванням особливостей ультразвукових імпульсних багатозонних термометрів запропоновані методики їх градуювання та перевірки.

### **Результати дисертаційної роботи висвітлені у 26 наукових працях, основними з яких є:**

1. Луцик Я.Т., Лозбин В.И., Лихновский И.С. Особенности применения акустических термометров для измерения температуры газовых потоков// Контрольно-измерительная техника.- 1986.- Вып.40.-С.54-57.

2. Лихновский И.С., Луцик Я.Т., Чех Р.И. Ультразвуковые импульсные тонкопроволочные термометры для высокотемпературных измерений// Контрольно-измерительная техника.- 1988.- Вып.43.-С.45-50.

3. Лихновский И.С., Луцик Я.Т., Левчук Н.Ю., Столярчук П.Г. Многозонные чувствительные элементы импульсных ультразвуковых термометров// Контрольно-измерительная техника.- 1988.- Вып.44.- С.77-80.

4. Лихновский И.С., Луцик Я.Т., Левчук Н.Ю. Использование крутильных колебаний в ультразвуковых импульсных термометрах// Контрольно-измерительная техника.- 1990.- Вып.48.- С.74-80.

422294

5. Ліхновський І.С., Луцик Я.Т., Герета Т.В. Формування чутливих елементів імпульсних акустичних термометрів// Вісник ЛПІ "Технічні засоби автоматизації вимірів та керування науковими дослідженнями".- 1992.-№267.-С.70-73.
6. Ліхновський І.С., Луцик Я.Т., Левчук Н.Ю. Устройство ввода-вывода цифровой информации ультразвукового измерительного комплекса// Вестник Львовского политехн. ин-та "Технические средства автоматизации измерений и управления научными исследованиями"- 1990.-№248.-С.56-58.
7. Луцик Я.Т., Дорожовец М.М., Ліхновський І.С. Погрешности импульсных ультразвуковых термометров// Измерительная техника.- 1992.- №6.- С.37-38.
8. Луцик Я.Т., Ліхновський І.С. Чутливі елементи одно- та багатозонних імпульсних термометрів// Контрольно-вимірвальна техніка.- 1993.-№50.-С.59-63.
9. Ліхновський І.С., Луцик Я.Т. Автоматичний пошук ехосигналів ультразвукового імпульсного термометра //Вісник ДУ "Львівська політехніка", "Автоматика, вимірювання та керування".- 1995.-№292.-С.48-50.
10. Луцик Я.Т., Дорожовець М.М., Ліхновський І.С. Похибки ультразвукових резонансних термометрів// Вимірвальна техніка і метрологія.- 1995.-№51.-С.24-27.
11. Стадник Б. Ліхновський І., Вимірювання розподілу температури багатозонним ультразвуковим імпульсним термометром//Праці 1-th International modelling school.- Krym Autumn '96.- Alushta.- Ukraine.- 1996.- С.89.
12. Lutsyk Ja., Levchuk N., Lichnovskiy I., Stadnyk B. Microprocessor ultrasonic complex for temperature measurement// IMECO Symposium on Microprocessors in temperature and thermal measurement.- Lodz(Poland).- 1989.- P.169-175.
13. А.с. 1343341 СССР, МКИ G01k29/00. Устройство для определения температурной зависимости модуля упругости материалов/ Я.Т.Луцик, Р.И.Чех, И.С.Лихновский, В.П.Мотало, В.В.Паракуда// Открытия. Изобретения. 1987. №37.
14. А.с. 1538063 СССР, МКИ G01k11/24. Ультразвуковой преобразователь температуры/ Я.Т.Луцик, Б.И.Гиль, П.Р.Гамула, И.С.Лихновский // Открытия. Изобретения. 1990. №3.
15. А.с. 1397751 СССР, МКИ G01k11/24. Ультразвуковой измеритель температуры/ Б.И.Стадник, Я.Т.Луцик, И.С.Лихновский, Р.И.Чех, М.П.Ковальская// Открытия. Изобретения. 1988. №19.
16. А.с. 1566231 СССР, МКИ G01k11/24. Ультразвуковой термометр/ Я.Т.Луцик, Н.Ю.Левчук, И.С.Лихновский, Б.И.Стадник// Открытия. Изобретения. 1990. №19.
17. А.с. 1652899 СССР, МКИ G01k29/00. Устройство для определения температурной зависимости модуля упругости материалов/ Н.Ю.Левчук, И.С.Лихновский, Я.Т.Луцик, Б.И.Стадник// Открытия. Изобретения. 1991. №20.
18. Ліхновський І.С., Левчук Н.Ю. Прибор для измерения модуля упругости образцов малых размеров//Тез. докл. Всесоюз. совещания молодых ученых и специалистов. "Проблемы

чувствительности электронных и электромеханических систем".- Москва.- 1987.- С.202

19) Лудик Я.Т., Лихновский И.С., Волков Е.Н. Принципы построения передающего устройства ультразвукового импульсного термометра//Тез. докл. VI Всесоюз. конф. Электрические методы и средства измерения температуры "Электротермометрия-88".- ч.2.- Луцк.- 1988.- С.264.

20) Лихновский И.С., Лудик Я.Т., Наливаев В.И., Беницкий С.С. Ультразвуковые термопреобразователи для высокотемпературных измерений//Тез. докл. VI Всесоюз. конф. Электрические методы и средства измерения температуры "Электротермометрия-88".-ч.2.-Луцк.- 1988.- С.263.

21) Лихновский И.С., Лудик Я.Т., Левчук Н.Ю., Наливаев В.И. Особенности анализа эхо-сигналов ультразвукового импульсного термометра//Тез. докл. VI Всесоюз. конф. Электрические методы и средства измерения температуры "Электротермометрия-88".-ч.2.-Луцк.- 1988.- С.262.

22) Левчук Н.Ю., Лихновский И.С., Лудик Я.Т., Константинов В.С. Расширение возможностей ультразвуковых термометров//Тез. докл. VI Всесоюз. конф. Электрические методы и средства измерения температуры "Электротермометрия-88".-ч.2.-Луцк.- 1988.- С.259.

**Ліхновський І.С. Ультразвуковий багатозонний вимірювач температури.**-Рукопис.

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.04-прилади та методи вимірювання теплових величин.- Державний університет "Львівська політехніка", Львів, 1997.*

Захищається 26 робіт, в тому числі 5 авторських свідоцтв, що містять теоретичні і практичні дослідження з розробки ультразвукових багатозонних імпульсних термометрів. Наведені результати математичного моделювання процесів формування акустичного сигналу в магнітострикційному перетворювачі і його проходження в чутливому елементі. Викладена методика розрахунку високотемпературного вузла термометра, а також дані рекомендації по оптимізації конструкції і вибору матеріалів. Розроблені схемні рішення вторинного приладу, що дозволило створити модифікації багатозонних імпульсних термометрів. Виконаний аналіз складових похибки вимірювання і вказані шляхи їх зменшення. Сформульовані рекомендації щодо градуювання ультразвукових багатозонних імпульсних термометрів.

**Ключові слова:** температура, вимірювання, ультразвук, акустичний, багатозонний імпульсний термометр, математичне моделювання.

**Лихновский И.С. Ультразвуковой многозонный измеритель температуры.**

*Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.04-приборы и методы измерения*

422394

*тепловых величин. Государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1997.*

Защищается 26 работ, в том числе 5 авторских свидетельств, которые содержат теоретические и практические исследования по разработке ультразвуковых многозонных импульсных термометров. Представлены результаты математического моделирования процессов формирования акустического сигнала в магнитострикционном преобразователе и его прохождения в чувствительном элементе. Изложена методика расчета высокотемпературного узла термометра, а также даны рекомендации по оптимизации конструкции и выбору материалов. Разработаны схемные решения вторичного прибора, на основе которых были созданы модификации многозонных импульсных термометров. Выполнен анализ составляющих погрешности измерения и показаны пути их уменьшения, а также сформулированы рекомендации по поверке ультразвуковых многозонных импульсных термометров.

*Ключевые слова:* температура, измерение, ультразвук, акустический, многозонный импульсный термометр, математическое моделирование.

**Likhnovskij I.S. Ultrasonics multizones measuring temperature.**

*Dissertation as manuskript for obtaining of the science degree competition, speciality 05.11.04-Devices and methods for measuring thermal values, State University "Lviv Polytechnic", Lviv, 1997.*

26 papers that includes 5 patents are defencing. This papers contain the results of theoretical and experimental research work that is concerned in the multizone ultrasonic pulse thermometer developing. The forming of acoustical signal by magnetostrictical transducer and the spreading of ultrasonic pulse though the sensor were simulated. There are recomendation for the high temperature sencor calculation and design. The algorithms and devices for signal processing are developed. The sources of errors and ways of their decreasing are shoun. The systematical instruction for metrological testing of ultrasonic pulse thermometers are presented.

*Key words:* temperature, measuring, ultrasound, acoustic, multizone pulse thermometer, mathematical modeling.

Підписано до друку 28.07.97 Формат 60\*84/16.

Друк офсетний. Папір офсетний. Обсяг 1 ум. др. арк.

Зам. №97/8-14 Тир. 100 прим.

Друк ТЗОВ «Простір М»



AB 38.348