

- подання математичної моделі для введення інваріантних поправок при зміні випромінювальної здатності окремих фрагментів досліджуваного об'єкта.

Крім вказаних проблем, найближчим завданням при створенні подібних скануючих пірометрів та вимірювальних систем на основі тепловізорів є:

- чітка прив'язка вимірювання до системи координат об'єкта дослідження;
- синхронність введення необхідних поправок (насамперед на випромінювальну здатність і фонове випромінювання, а також на можливу зміну робочої відстані);
- вдосконалення метрологічного забезпечення, особливо на етапі експлуатації цих систем споживачем.

1. ДСТУ 3170-95 (ГОСТ 28243-96) Пірометри. Загальні технічні вимоги. К., 1995. 2. ДСТУ 3171-95 (ГОСТ 8335-96) Пірометри візуальні із зниклою ниткою. Загальні технічні умови. К., 1997. 3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М., 1988. 4. ДСТУ 3194-95. Державна повірочна схема для засобів вимірювання температури за випромінюванням. К., 1995. 5. Thermovision 780. Thermoprofile. AGA: 1994. 6. Пастернак Я.А. Температура печи как объективный критерий состояния футеровки. Контрольно-измерительная техника. Львов, 1985. 7. Засименко В.М. Розрахунковий метод градуювання і повірки пірометричних перетворювачів і пірометрів випромінювання // Вісник ДУ "Львівська політехніка", 1998. № 348. С.41 – 44.

УДК 621

## СПОСОБИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА АКУСТИЧНИМ ВИПРОМІНЕННЯМ

© Богдан Стадник, Любомир Буняк, Роман Віблій, Арсен Семенистий, 2000

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра "Інформаційно-вимірювальна техніка",  
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна  
Державне акціонерне підприємство "Магістральні нафтопроводи "Дружба"  
вул. Липинського, 12, 79058, Львів, Україна

*Розглядаються проблеми реконструкції температурного поля за акустичним випроміненням в ультразвуковому діапазоні. Дано характеристику двох методів реконструкції – реконструкції алгебраїчним методом та реконструкції, що базується на статистичних алгоритмах.*

*Рассматриваются проблемы реконструкции температурного поля по акустическому излучению в ультразвуковом диапазоне. Дана оценка двух методов реконструкции – реконструкции алгебраическим методом и реконструкции, которая базируется на статистических алгоритмах.*

*Of a problem of reconstruction of a temperature field by acoustical radiation in a ultrasonic range was examine. There are estimate two methods of reconstruction – reconstruction by an algebraic method and reconstruction which is founded on statistical algorithms.*

Вимірювання температури за пасивним випроміненням не є новим у вимірювальній техніці. Нині широко використовують для вимірювання високих температур інфрачервоне випромінення, ведуться роботи із вдосконалення термометрів, що працюють у радіочастотному діапазоні. На жаль, всі ці методики не є самовистачальними. Так, ми не можемо з достатньою точністю визначити за інфрачервоним випроміненням, яка температура є усередині об'єкта. Крім того, накладаються додаткові обмеження щодо середовища, в якому проходять вимірювання. Визначення темпера-

тури за пасивним акустичним випроміненням твердих та рідких середовищ дозволяє проводити дослідження, для виконання яких засоби радіолокації, інфрачервоної техніки та активної акустоскопії є непридатними або недостатніми.

Цей метод вимірювання температури вперше був запропонований Бабієм ще 1974 року [1], а пізніше Бовеном (який запатентував його у 1981) [2]. Перші експериментальні дані були отримані Миргородським [3], який показав можливість вимірювання температури за акустичним випроміненням. До переваг методу

належать: набагато менше порівняно з електромагнітними хвилями (використовується в радіометрії) загасання акустичних хвиль, що приводить до кращої роздільної здатності та більшої глибини зондування. Метод дає також змогу працювати в середовищах з високою електропровідністю (метали, напівпровідники, розчини електролітів), для чого засоби радіолокації є непридатними.

Ідея використання пасивного акустичного випромінювання для вимірювання температури виникла на базі вимірювань температури за допомогою СВЧ-випромінювання.

Так, простежується аналогія у виразах Найквіста для квадрата напруженості електричної складової електромагнітної хвилі  $E^2$  та квадрата акустичного тиску  $p^2$ :

$$E^2 = 4\pi f^2 c^{-3} k T \Delta f \quad (1)$$

$$p^2 = 4\pi f^2 u^{-1} \rho k T \Delta f \quad (2)$$

де  $u$  та  $c$  – швидкості звуку та електромагнітної хвилі відповідно;  $f$  – частота;  $\rho$  – густина,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура.

Фізичною причиною акустичного теплового випромінювання тіла є тепловий хаотичний рух його атомів та молекул. На поверхні тіла ми вимірюємо середній квадрат акустичного тиску  $p^2$ , який пропорційний в гомогенних середовищах до абсолютної температури середовища  $T$ . При цьому необхідно визначати зміни тиску звукової хвилі порядку  $\Delta p = 10^{-5}$  Па.

Пасивну акустичну томографію спочатку передбачалося використовувати для вимірювання температури в медицині. У цій галузі гостро стоїть проблема визначення внутрішнього розподілу температури з достатньою точністю (не менше за 0,1К). Зважаючи на це, було розроблено дві методики визначення температури за акустичним тиском, які відрізняються способом реконструкції температурного розподілу. З самого початку для визначення температури використовувалися алгебраїчні методи реконструкції. При цьому розв'язується обернена задача акустотермографії – знаходження внутрішньої температури об'єкта (біоб'єкта) за його тепловим акустичним випромінюванням, що вимірюється в мегагерцовому діапазоні. Тобто температура в глибині об'єкта відтворюється за значеннями вимірюваної акустоскравісної температури – температури чорного тіла, яке створює такий самий потік акустичного випромінювання, як і досліджуване тіло. Акустоскравісну температуру визначають як:

$$\tau = \gamma \int_0^{\infty} T(l) \exp(-\gamma(l)) dl, \quad (3)$$

де  $T(l)$  – розподіл термодинамічної температури по променю  $L$ , початок променя відповідає ( $l=0$ ) розташуванню п'єзоперетворювача.

Реконструкція просторового розподілу температури належить до некоректно поставлених задач. Тобто малим похибкам вимірювання можуть відповідати як завгодно великі похибки реконструкції. Отже, основними характеристиками для оцінки якості відновлення розподілу є точність визначення температури при заданій точності вимірювання, а також просторова роздільна здатність. При використанні алгебраїчних методів похибка та роздільна здатність залежать передусім від методу реконструкції та від заданого закону апроксимації розподілу. Так, при переході від розподілу, що задавався кусковою функцією на основі перетворення Фур'є (4) до розподілу, в якому враховується перенесення тепла за рахунок кровообігу (5) точність відновлення температури зростає у два рази з 0,7К [4] до 0,4К [5].

$$T(x, y) = \sum_{n_x=-n_x^M}^{n_x^M} \sum_{n_y=-n_y^M}^{n_y^M} z(n_x, n_y) \exp(2\pi i(n_x x / L_x + n_y y / L_y)) \quad (4)$$

де  $n_x, n_y$  – номери просторових гармонік по осях  $x$  та  $y$  відповідно,  $n_x^M = (N_x - 1) / 2$ ,  $n_y^M = (N_y - 1) / 2$  – максимальні номери гармонік. Нульова гармоніка розташовується в центрі матриці  $z(n_x, n_y)$ , що описує область температури, в якій необхідно реконструювати;  $L_x, L_y$  – довжина області по  $x$  та  $y$ .

$$T(x, y) - x_D^2 \Delta T(x, y) = q(x, y) \quad (5)$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $x_D = \sqrt{D / \lambda}$  – коефіцієнт, що визначається коефіцієнтом температуропровідності  $D$  та величиною об'ємного кровотоку  $\lambda$ ;  $q(x, y)$  – просторова густина джерел температури.

Щодо методу реконструкції, то для алгебраїчного відновлення розподілу зручно використовувати простий метод найменших квадратів та його різновиди. Згідно з попередніми дослідженнями, проведеними у роботі [6], звичайний метод найменших квадратів можна використовувати при довільному характері розподілу. Цей метод є найбільш універсальним. Знаючи попередньо характер розподілу, можна зменшити похибку, використовуючи різновиди методу найменших квадратів.

Для гладких розподілів доцільно використовувати метод регуляризації за Тихоновим. Якщо ж сильно нагрівається лише частина досліджуваної області, використовується метод відкидання нефізичних рішень. За формулами, наведеними у [8], при частоті  $f=1\text{МГц}$  та коефіцієнті послаблення  $\gamma=0,2\text{см}^2$  є можливим відновлення температури на глибині 3-4 см з похибкою у 0,5-0,7 К. Серед згаданих вище методик найбільш перспективною з погляду точності є методика реконструкції за Тихоновим. Використовуючи різні способи регуляризації, теоретично вдається досягнути точності 0,3 К, при цьому просторова роздільна здатність не перевищує  $5\text{мм}^2$ . Природно сподіватися, що кількість вимірювань може покращити точність та роздільну здатність методу. Та як показали результати моделювання [7], збільшення кількості вимірювань не приводить до істотного покращання точності. При збільшенні вимірювань з 300 до 600, тобто фактично у два рази, точність зросла не більше ніж на 20%. Основну частину похибки (90%) становить систематична похибка, що визначається не точністю вимірювального приладу, а алгоритмом відновлення.

Другим напрямком відновлення температурного розподілу є реконструкція, що базується на статистичних алгоритмах [8]. При цьому використовують решітку лінійних приймачів та алгоритми некогерентної хвильової томографії. Обернена задача зводиться до відновлення розподілу інтенсивності  $\delta$  корельованих джерел з автокореляційною функцією:

$$\partial_{ff}(r_1, r_2) = I(r_1)\delta(r_2 - r_1) \quad (6)$$

де  $I(r_1)$  – неперервна невід’ємна функція інтенсивності джерела,  $\delta(r_2 - r_1)$  – 3-вимірний діраковський  $\delta$ -функція.

Алгоритми відновлення будуються на накопиченні вибірових кореляційних моментів сигналів з решітки давачів, які розташовуються навколо джерел акустичного випромінювання. Опитування давачів проводиться з певним ваговим коефіцієнтом. Реконструкція з використанням статистичних методів дозволяє принаймні теоретично досягнути точності 0,1 К при просторовій роздільній здатності близько  $1\text{мм}^2$ .

Важливим аспектом при відновленні температури є точність вимірювання акустичних шумів. Щодо схематичних рішень доцільно використовувати методики, відомі з вимірювання температури за тепловими шумами. Шумові термометри мають високу точність

результатів вимірювання і можуть використовуватись як зразкові прилади для побудови термодинамічної шкали. В основі шумового термометра лежить виведена Х.Найквістом залежність потужності шумового сигналу на електрично невантаженому опорі від температури, частотного діапазону та значення опору, отримана методом статистичної термодинаміки згідно з виразом

$$E^2 = 4kT\Delta f \text{Re}Z, \quad (7)$$

де  $E^2$  – середній квадрат шумового сигналу;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – термодинамічна температура;  $\text{Re}Z$  – активна складова опору.

Якщо зіставити рівняння (2) та (7), то вони аналогічні, тобто фактично для вимірювання потужності акустичного шуму можна використовувати схематичні засоби, на яких базується шумова термометрія. При цьому змінюють лише давач.

### Висновки

Акустична термографія не є заміником інших видів вимірювання температури за пасивним випромінюванням з об’єкта, але вона може доповнити їх для отримання повної картини температурного розподілу. Сьогодні використання акустотермографії в цьому напрямку пов’язане зі значними конструктивними та схематичними труднощами, особливо при кореляційному вимірюванні температури, де потрібна велика кількість давачів. Але з точки зору отримання досить високої точності та роздільної здатності, з якою можна вимірювати температуру всередині об’єкта, статистичний метод вимірювання температури перспективний для подальших досліджень. Розвиток алгебраїчних методик пов’язаний передусім з пошуком нових точніших алгоритмів реконструкції та функцій, які апроксимують температурний розподіл. Одним з розв’язків цієї проблеми могло б бути використання алгебраїчних реконструктивних технологій, що ґрунтуються на ітераційному алгоритмі, запропонованому Качмарем [9]. При цьому дозволяється зменшити похибку обчислень (а, отже, реконструкції) при великій кількості невідомих. Ще однією перевагою методу є зменшення часових затрат при обчисленні, що робить алгоритм привабливим з точки зору його практичного використання.

Не слід забувати про ще одну галузь, де вже використовують пасивне акустичне випромінювання. Зокрема це визначення дефектів у об’єкті за акустичними шу-

мами. Так, ведуться розробки, пов'язані з вимірюванням акустичних шумів, спричинених внутрішніми напруженостями у матеріалі об'єкта.

1. Бабий Перенос акустической энергии в поглощающей и излучающей среде // Морск. гидрофизич. исслед. 1974. №2 (56). С 189-192. 2. Bowen T.S. US pat 1983 № 4385634. 3. Миргородский В.И., Пасечник В.И., Пешин С.В. и др. Зондирование внутренней температуры объектов по их тепловому акустическому излучению // ДАН, 1987. Т.297. №6. С. 1370-1372. 4. Аносов А.А., Бограчев К.М. Измерение теплового акустического излучения из кисти руки человека // Акустический журнал. 1998. Т. 44. №6. С.725-730.

5. Аносов А.А. Восстановление двумерного распределения внутренней температуры модельного объекта методом пассивной термоакустической томографии // Акустический журнал. 1999. Т 45. № 1. С 20-24. 6. Аносов А.А., Исрефиллов М.Г. Точность решения двумерной обратной задачи акустотермографии при некорреляционном приеме // Радиотехника. 1995. № 9. С 65-68. 7. Anosov A.A., Isrefilov M.G. Physical basis and perspectives of acoustothermography // Ultrasonics. 1996. Vol.34. P 511-512. 8. Буров В.А., Касаткина Е.Е. Статистические обратные задачи термоакустической томографии. // Акустический журнал. 1997. Т 43. № 2. С 162-169. 9. Дорожовець М.М. Математичні проблеми реконструкції образів у технічній томографії // Вимірювальна техніка та метрологія. 1998. №53. С 3-17.

УДК 536.5

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У КОРПУСІ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧА

© Богдан Стадник, Ольга Лиса, Михайло Семерак, Валентин Виходець, 2000

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра "Інформаційно-вимірювальна техніка",  
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна  
Львівський державний аграрний університет, 79060, Львів-Дубляни, Україна

*Досліджується похибка поверхневих термометрів, зумовлена теплопритоканням.*

*Исследуется погрешность поверхностных термометров, вызванная теплопритоком.*

*The work is devoted to research of an error of superficial thermometers caused by inflow of heat.*

Підвищення точності вимірювання температури різних середовищ при багаторазових різких охолодженнях і відігривах вимагає подальших аналітичних досліджень інструментальної похибки термометрів (ТП). У даній роботі запропоновано аналітичне дослідження складової інструментальної похибки термометрів, зумовленої притоканням тепла при вимірюванні низьких температур і відтіканням тепла при вимірюванні високих температур. Величина вказаної похибки залежить від конструктивного виконання ТП, інтенсивності теплообміну з вимірюваним середовищем і особливостей його контакту з зовнішнім середовищем.

Досліджено похибку, зумовлену теплопритоканням поверхневих термометрів, в яких спіральний навій чутливого елемента, виготовлений із платинової дротини діаметром 0.03 мм, розміщений в каналах керамічного плоского ізолятора. Канали каркаса з поміщеними в них спіралями чутливого елемента заповнюються спеціальним порошком, який захищає витки від закорочення і покращує тепловий

контакт між спіралями і каркасом. Плоский ізолятор прикріплюється до корпусу за допомогою органосилікатного клею ОС-51-03. Корпус термометрів для кріплення і суцільного прилягання до масивного об'єкта вимірювання має гвинт. Теплопередача між чутливим елементом та об'єктом вимірювання проходить через керамічний каркас, органосилікатний клей і корпус.

Для визначення і дослідження температурного поля термометрів у захисному корпусі змодельованого кусково-однорідним ступінчастим стрижнем з різними коефіцієнтами теплообміну з його поверхонь (див. рисунок). Циліндричний стрижень 1 радіусом  $R_1$  і довжиною  $L_1$  моделює різьбове з'єднання; циліндричний стрижень 2 радіусом  $R_2$  і довжиною  $(L_2-L_1)$  моделює перехідний циліндричний стрижень між різьбовим з'єднанням і корпусом ТП, циліндричний стрижень 3 радіусом  $R_3$  і довжиною  $(L_3-L_2)$  моделює корпус ТП.

Під час вимірювання температур ТП знаходиться у двох середовищах: різьбове з'єднання і перехідний циліндричний стрижень знаходиться у вимірювальному-