

УДК 518.54

В.С. Шикалов, Т.Ю. Пристайло

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ЦИФРОВИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ

Розроблено цифровий прилад для вимірювання теплофізичних параметрів матеріалів, таких як коефіцієнт теплопровідності, температуропровідність, питома теплоємність. Для можливості проведення експрес-аналізу в основу його роботи закладена метод нестационарного режиму теплообміну з використанням лінійного імпульсного нагрівача.

Ключові слова: магнітотрикуційний датчик температури, лінійний імпульсний нагрівач.

Постановка проблеми

Теплофізичні параметри будівельних та теплоізоляційних матеріалів відіграють вирішальну роль в оцінці їх якості та визначення галузі їх застосування. Один з основних експлуатаційних параметрів будівельних і теплоізоляційних матеріалів – це теплопровідність. Тому розробка і використання приладу для вимірювання теплофізичних параметрів має першочергове значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Всі методи визначення теплофізичних параметрів поділяються на стаціонарні і нестационарні. Стаціонарні методи вимірювання є більш точними, але вони мають недоліки: складану апаратуру та велику тривалість виміру за часом (декілька годин). Це стало причиною того, що на сьогодні основними методами дослідження теплофізичних параметрів є нестационарні методи. Сучасні засоби вимірювання теплофізичних величин нестационарним методом використовують нагрівачі в якості джерела теплового поля і датчики температури для фіксації значень температури у визначених точках температурного простору окремо. Наприклад, для визначення теплофізичних параметрів (температуропровідність, теплопровідність, питома теплоємність) необхідно знати характер просторово-часових змін температури та кількість тепла, що поглинається або віддається тілом.

Для визначення теплофізичних параметрів широко застосовують метод безперервного постійного лінійного джерела тепла або імпульсний

метод лінійного джерела тепла. Основою для створення імпульсних методів комплексного визначення теплофізичних характеристик матеріалів є закономірності розвитку нестационарних температурних полів, створюваних дією миттєвих точкових, лінійних або плоских джерел тепла в необмеженому тілі.

Універсальна функція (1) є загальним рішенням диференціального рівняння теплопровідності для випадку дії миттєвого точкового джерела тепла в точці (x_1, y_1, z_1) необмеженого тіла.

$$\Theta = T(x, y, z, \tau) - T_0 = \frac{Q}{8c\gamma[\pi a(\tau - t)]^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}{4a(\tau - t)}\right], \quad (1)$$

Якщо проінтегрувати вираз (1) по відповідних координатах, отримуємо рішення для миттєвих і безперервних лінійних, плоских, сферичних або циліндрових поверхневих джерел тепла, що діють в необмеженому середовищі.

Для миттєвого лінійного джерела тепла вираз для двовимірного температурного поля $\Theta_1(x, y, \tau)$, яке створюється лінійним миттєвим джерелом тепла Q_1 , Дж/м, діючим у момент часу $\tau = t$ на прямій, паралельній осі z , яка проходить через точку (x_1, y_1) , виходить інтегруванням виразу (1) по dz_1 в межах від $-\infty$ до $+\infty$, тобто Q_1 - кількість тепла, що миттєво виділяється одиницею довжини лінійного джерела тепла у момент часу $\tau = t$.

$$\Theta_1 = T(x, y, \tau) - T_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(x, y, z, \tau) dz_1 = \frac{Q_1}{4\pi\lambda(\tau - t)} \exp\left[-\frac{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}{4a(\tau - t)}\right], \quad (2)$$

При використанні імпульсного методу лінійного джерела тепла для визначення теплофізичних характеристик вирішується двовимірне рівняння теплопровідності для необмеженого тіла в випадку дії в ньому в перебігу часу τ_0 короткочасного лінійного джерела тепла. Це рішення отримується інтегруванням виразу (2) по dt в межах від нуля до τ_0 .

Рішення записується для точки, яка знаходиться на відстані $r_0 = \sqrt{x^2 + y^2}$ від лінійного джерела, яке проходить крізь точку ($x_1 = y_1 = 0$).

Значення максимуму надмірної температури $\Delta T_{\max} = T(r_0, \tau_{\max}) - T_0$ в точці r_0 буде відповідати моменту часу $\tau = \tau_{\max}$

$$\Delta T_{\max} = \frac{q_L}{4\pi\lambda} \int_0^{\tau_0} \exp\left[-\frac{r_0^2}{4a(\tau_{\max} - t)}\right] \frac{dt}{(\tau_{\max} - t)} \quad (3)$$

Якщо лінійне жерело тепла буде являти собою одночасно і датчик температури, то з виразу (3) для точок $r_0 = 0$, які розташовані на лінії дії короткочасного джерела тепла в момент часу $\tau_1 > \tau_0$, надмірна температура $\Delta T = \Delta T_H$ може бути розрахована за формулою

$$T = (0, \tau_1) - T_0 = \Delta T = \frac{q_L}{4\pi\lambda} \int_0^{\tau_0} \frac{dt}{\tau_1 - t} = \frac{q_L}{4\pi\lambda} \ln \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_0} \quad (4)$$

Саме з цього рівняння отримують просту формулу для обчислення теплопровідності

$$\lambda = \frac{q_L}{4\pi\Delta T_H} \ln \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_0}, \quad (5)$$

$$\text{де } q_L = \frac{0,24 \times I^2 R_H}{l_H};$$

I – струм, який проходить через лінійний імпульсний нагрівач;

R_H, l_H – опір та довжина нагрівача;

τ_1 – інтервал часу між моментами включення нагрівача та виміром його температури;

τ_0 – час дії нагрівача;

ΔT_H – зміна температури нагрівача за час τ_1 .

При цьому треба враховувати, що джерело тепла і датчик температури повинні бути суміщенні.

Деякі конструкції для виміру теплофізичних параметрів описані в трудах Карслоу, Єгера [1], А.В. Ликова [3], В. Л. Шевченко, М. В. Кулакова А.Ф.Чудновского, Л.П.Филипова, Л.Ф.Янкелева, Л.Н.Новиченок, В.М.Марушкевича.

В існуючих методах виміру теплофізичних параметрів матеріалів застосовують окремо датчики температури і різноманітні нагрівачі в якості джерела тепла. Температура нагрівача вимірюється за допомогою датчиків, які мають механічний контакт з нагрівачем в визначеній точці виміру. При цьому похибка виміру температури не враховується.

Окремо слід підкреслити існування первинної нелінійності у існуючих датчиків температури.

Мета роботи

Розробка цифрового приладу для вимірювання теплофізичних параметрів, який має значно менші похибки порівняно з існуючими приладами.

Викладення основного матеріалу

На рис.1 надана структурна схема приладу для вимірювання коефіцієнту теплопровідності. В основу роботи цього приладу закладен метод нестационарного режиму теплообміну з використанням лінійного імпульсного нагрівача. Суть виміру коефіцієнту теплопровідності за даною методою полягає в тому, що на лінійний імпульсний нагрівач 1, який розміщено в матеріалі, що досліджується, подають тепловий імпульс і визначають зміну температури нагрівача в часі. В якості лінійного імпульсного нагрівача 1 використовується проволочка, виконана з магніострикційного матеріалу, по якій пропускають імпульс електричного струму від джерела живлення у вигляді стабілізатора струму.

Коефіцієнт теплопровідності матеріалу, визначаємий за даною методою, обчислюють за формулою (5).

Якщо в пристрої підтримується постійними значення величин $I, R_H, l_H, \tau_1, \tau_0$, то величина коефіцієнта теплопровідності λ є однозначною функцією зміни температури лінійного імпульсного нагрівача ΔT_H . Вимір коефіцієнту теплопровідності за допомогою запропонованого пристрою виконується в автоматичному режимі наступним чином.

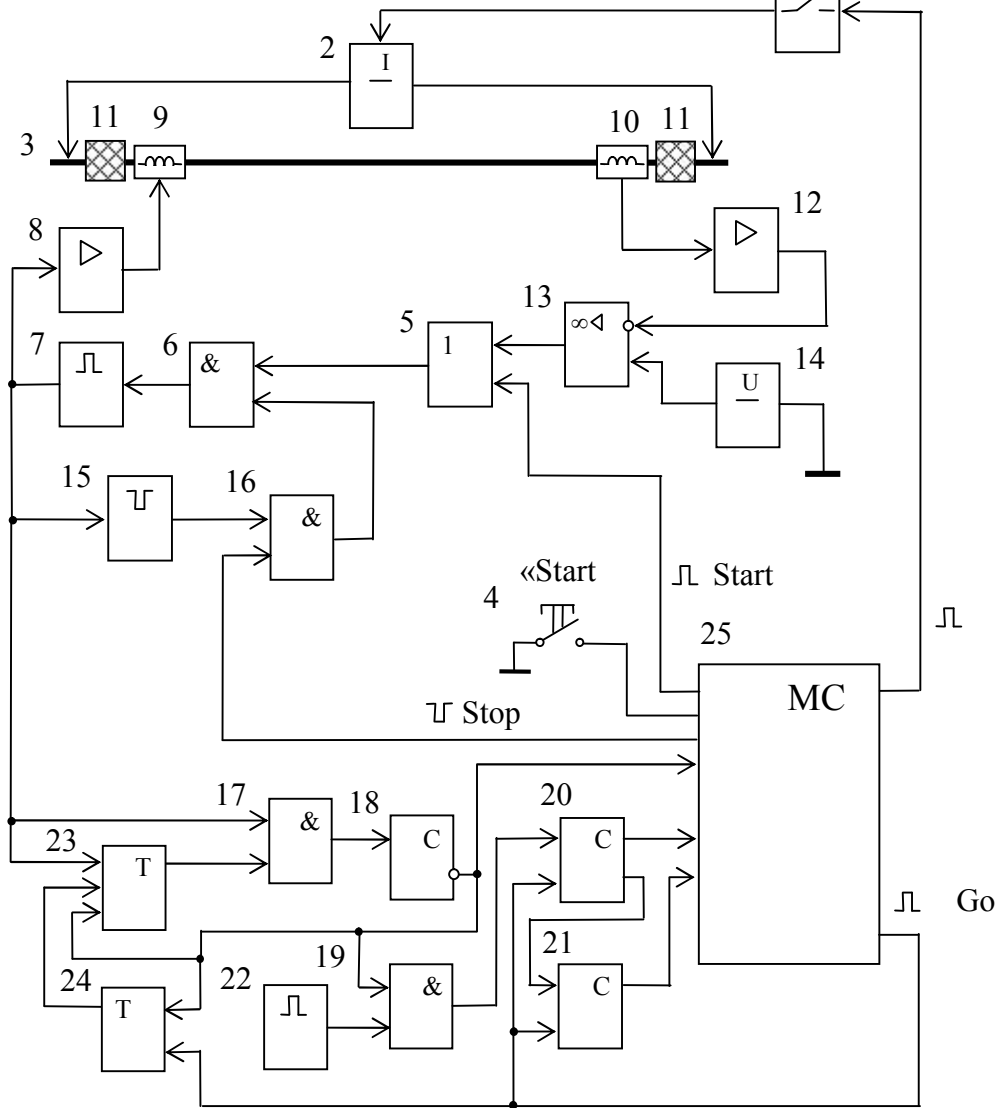


Рис. 1. Схема магнітострикційного перетворювача для виміру теплопровідності в автоматичному режимі.

З початку циклу виміру по команді мікроконтролера 25 формується імпульс заданої тривалості, який через ключ 1 підключає до магнітострикційного звукопроводу 3 джерело струму 2. Формується імпульс струму певної тривалості через нікелевий звукопровід 3. По закінченні імпульса починаються цикли виміру темпу охолодження звукопроводу. Це виконується виміром часу проходження ультразвукового імпульсу через магнітострикційний звукопровід. По натисканні кнопки «Start» 4 мікроконтролер 25 генерує одиничний імпульс. Цей імпульс через елемент АБО 5, та елемент І 6 переднім фронтом запускає формувач імпульсу заданої тривалості 7. Таким чином формується імпульс «запису», який через підсилювач 8 поступає на катушку запису 9.

Під катушкою запису в нікельовому звукопроводі завдяки прямому ефекту

магнітострикції формується ультразвуковий імпульс, який розповсюджується вздовж звукопровода в обох напрямках. При досягненні цього імпульсу катушці зчитування 10 завдяки зворотньому ефекту магнітострикції в катушці утворюється електричний імпульс зчитування. Для приглушення небажаних відображень звукових хвиль від кінцівок звукопровода використовуються глушники 11.

Імпульс зчитування через підсилювач 12 потрапляє на компаратор 13. Компаратор фіксує час надходження імпульсу зчитування і на виході формує імпульс, котрий через елементи АБО 5 та І 6 знову поступає на формувач імпульсу запису 7. Для завдання рівня спрацьовування компаратора 13 використовується джерело опорної напруги 14. Елементи формувач імпульсу зворотньої полярності 15 та елемент І 16 використани для погашення

можливих хибних спрацювань компаратора під час проходження ультразвукового імпульсу через звукопровід.

Таким чином утворюється замкнене коло, формуюче цикли запису-зчитування через магніострикційний звукопровід. Завдяки цьому реалізується алгоритм точного виміру затримки часу проходження ультразвукового імпульсу через звукопровід шляхом складання кількості замкнених циклів виміру. Для визначення часу проходження використовується формула

$$\tau_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n}, \text{ де}$$

τ_i – час проходження ультразвукового імпульсу в кожному окремому циклі,

n – кількість циклів виміру.

Величина $\sum_{i=1}^n \tau_i$ вимірюється наступним чином.

Імпульси запису через елемент І 17 подаються на лічильник 18. Інверсний сигнал старшого розряду з виходу лічильника 18 через елемент І 19 дозволяє рахунок зведеного багато- розрядного лічильника 20, 21. На цей лічильник поступає частота з зразкового генератора імпульсів 22. Цей генератор працює на високій частоті, що забезпечує необхідну точність вимірювання часу затримки. Тригер 23 забороняє рахунок лічильника 18 по досягненні 256 циклів виміру часу проходження ультразвукового імпульсу лічильником 18. Скид цього тригера та запуск наступного циклу виміру відбувається через тригер 24 по сигналу «Go» з мікроконтролера 25.

Зчитування отриманого значення величини часу затримки проходження ультразвукового імпульсу через магніострикційний перетворювач в цифровому вигляді з лічильників 20, 21 мікроконтролер 25 призводить за сигналом переповнення лічильника 18. Надалі виконується обробка отриманих значень для розрахунку необхідної величини теплопровідності мікроконтролером.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Розроблен цифровий прилад для вимірювання теплопровідності різних матеріалів. Використання магніострикційного перетворювача в якості нагрівача і одночасно вимірювача температури дозволяє виконувати виміри температури нагрівача в точці дії миттєвого або безперервного джерела тепла. При цьому похибка виміру температури буде наближатися до нуля і буде залежати тільки від

точності виміру часу розповсюдження ультразвукового імпульсу в звукопроводі магніострикційного перетворювача.

Пропонується виконання подальших досліджень властивостей магніострикційних перетворювачів, використаних в якості лінійних імпульсних джерел тепла, для виміру теплофізичних параметрів твердих тіл, особливо у галузі будівельних матеріалів.

Список літератури

1. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер (пер. с англ. под ред. проф. Померанцева А.А.). – М.: Наука, 1964.- 488 с.
2. Платунов Е.С. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов. – Машиностроение, 1986. – 365 с.
3. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. Лыкова А.В. – М., 1973 – 336с.
4. Шикалов В.С. Технологічні вимірювання. Навч. Посібник. – К.: Кондор, 2006. – 165 с.
5. А.С.№1347697СССР. Шикалов В.С. Устройство для измерения коэффициента теплопроводности, 1986.

Стаття надійшла до редколегії 12.12.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Скіданов, кафедра АТП, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.