

УДК 536.2.023

Юрій Скрипник, Геннадій Юрчик*, Володимир ВодотовкаКиївська державна академія технологій та дизайну,
кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій,

*НУ “Львівська політехніка”,

кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

ЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВІДНОСТІ ОРГАНІЧНИХ І НЕОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

© Скрипник Юрій, Юрчик Геннадій, Водотовка Володимир, 2001

It is stated the frequency method of measuring organic and inorganic materials temperature-conductivity coefficient by means of plane temperature waves excitation in material, that is by oscillating process (due to material heating) excitation.

Для вирішення задач, пов'язаних із знаходженням теплових і температурних полів, оцінкою теплоінерційних властивостей і якості твердих органічних і неорганічних матеріалів, які виготовляються (полімери-діелектрики, напівпровідники, кераміка, ферити, метали, сплави), необхідно знати значення коефіцієнтів температуропровідності цих матеріалів. Крім того, залежність теплофізичних властивостей згаданих матеріалів від температури, вологи, тиску та інших впливових факторів викликає необхідність періодичного неруйнівного контролю теплофізичних характеристик матеріалів, зокрема і температуропровідності, в умовах їх виготовлення і експлуатації.

На практиці в багатьох випадках коефіцієнт температуропровідності оцінюють стандартним непрямим методом відповідно до формули [1, 2, 3, 4]:

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho_v} \quad (1)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; C – питома теплоємність матеріалу, $\text{кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$; ρ_v – густина матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Як впливає з наведеної формули, цей метод визначення коефіцієнта температуропровідності дуже трудомісткий, потребує багато часу для отримання кінцевого результату, а похибка може становити кілька відсотків. Відомі також автоматичні вимірювачі температуропровідності матеріалів [5], але вони відрізняються схемною і конструктивною складністю, здійснення циклу вимірювання потребує також багато часу, а похибка результату може сягати десяти відсотків. Тому пошук і розробка нових методів, які б відрізнялися прямим способом вимірювання коефіцієнта температуропровідності на основі простих технічних рішень з підвищеною точністю і швидкістю залишається нині актуальним завданням.

Суть викладеного методу вимірювання температуропровідності матеріалів [6, 7] полягає в автоматичному спостереженні за часовою залежністю температури на торцевій поверхні взірця матеріалу після того, як його протилежна сторона підпала під дію імпульсного нагріву, який збуджує в матеріалі плоскі температурні хвилі, тобто коливальний процес, зумовлений періодичним нагрівом контрольованого матеріалу. Одним з основних обмежень методу, від якого залежить його точність, є порівняно малі значення критерію Ві [8], що

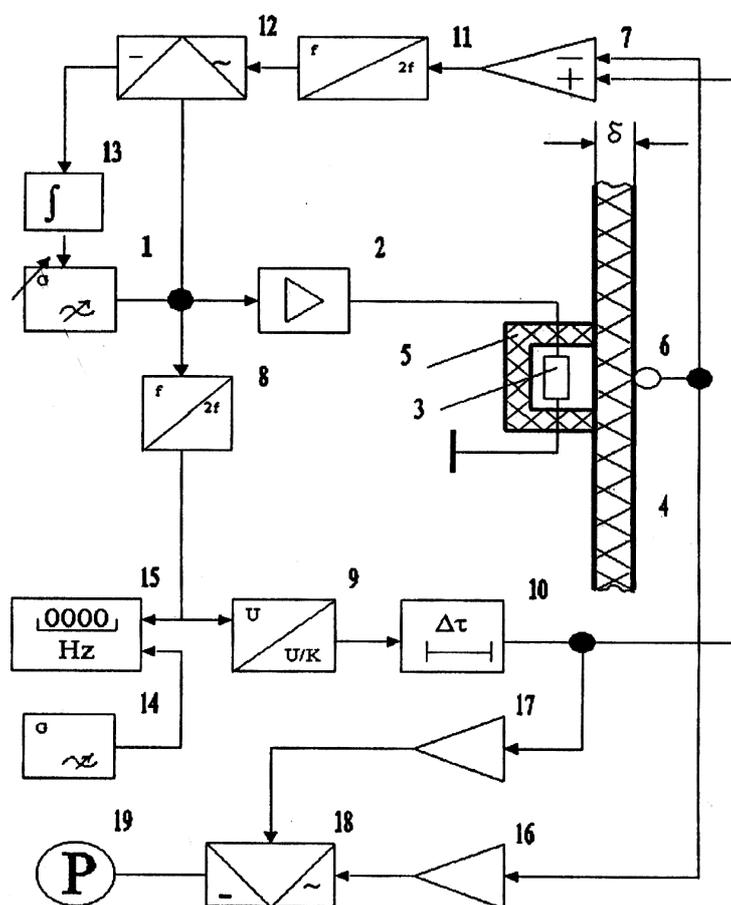
еквівалентно застосуванню при вимірюванні зрізів контрольованих матеріалів у формі пластин товщиною до 10 мм, тобто коли товщина пластини набагато менша від її поперечних розмірів

$$\text{Критерій Ві } 0,1 < \frac{\alpha \cdot x}{L} < 0,5, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, Вт/м²К; x – товщина пластини контрольованого матеріалу, м.

Використання явища поширення температурних хвиль в контрольованому матеріалі на частотах від десятка герц до десятих часток герца дає можливість реєструвати коливання за допомогою нескладних радіотехнічних засобів, які випускаються серійно, що, з одного боку, забезпечує підвищення точності вимірювання, а з іншої – зручність та простоту технічного рішення.

На рисунку наведена функціональна схема автоматичного пристрою для здійснення частотного методу прямого вимірювання коефіцієнта температуропровідності матеріалів.



Пристрій для вимірювання температуропровідності матеріалів:

- 1 – керований по частоті низькочастотний генератор; 2 – підсилювач змінного струму;
 3 – малоінерційний нагрівач, встановлений на поверхні контрольованого зріза 4;
 5 – теплоізоляційна оболонка; 6 – малоінерційний термосенсор; 7 -- диференційний підсилювач напруги низької частоти; 8 – подільник частоти генератора 1; 9 – подільник напруги; 10 – ланка часової затримки; 11 – подільник частоти сигналу термосенсора 6; 12, 18 – фазочутливий випрямляч; 13 – інтегратор; 14 – низькочастотний генератор; 15 – цифровий частотомір; 16, 17 – підсилювач напруги низької частоти; 19 – цифровий індикатор температури поверхні контрольованого матеріалу

Генератор електричних коливань низької частоти 1, яка змінюється під впливом сигналів від інтегратора 13, посилає через підсилювач 2 змінний струм у малоінерційний нагрівач 3. Температура нагрівача змінюється згідно з подвоєною частотою генератора і ці зміни (температурні хвилі) проходять через контрольований матеріал 4 завтовшки δ і приймаються малоінерційним термосенсором 6 (наприклад, оголеним робочим кінцем мікро-термопари або болометром). Теплова ізоляція 5 повинна зменшувати втрати тепла в навколишній простір, зміни якого впливають на точність вимірювання.

Якщо немає змінної складової теплообміну взірця з навколишнім простором, то в об'ємі матеріалу 4, в якому збуджується температурна хвиля, розподіл температури всередині матеріалу вздовж осі координат x , перпендикулярної пластині, описує вираз [8]

$$T = T_0 \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega_0}{2a}}\right) \cos\left(\omega_0 t - x\sqrt{\frac{\omega_0}{2a}}\right), \quad (3)$$

де T_0 – температура на поверхні матеріалу, що нагрівається ($x = 0$); ω_0 – кутова частота температурної хвилі; a – коефіцієнт теплопровідності.

Як видно з виразу (3), амплітуда температурної хвилі T_0 експоненціально зменшується у міру заглиблення в тіло контрольованого матеріалу, а відставання по фазі зростає лінійно.

Відсутність змінної складової теплообміну взірця матеріалу з навколишнім середовищем забезпечуються, з одного боку, виконанням критерію Ві, а з іншого тим, що, згідно з методом вимірювання, температура нагрітої і ненагрітої поверхонь взірця не перевищують 400 К; змінні складові радіаційного і кондуктивного теплообміну мізерно малі і ними можна знехтувати.

Частоту ω_1 генератора 1 змінюють доти, доки довжина температурної хвилі

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{2a}{\omega_0}} \quad (4)$$

в матеріалі 4 не дорівнюватиме його товщині δ . Враховуючи, що частота коливань температури в матеріалі вдвічі вища за частоту коливань генератора 1 ($\omega_0 = 2\omega_1$), дістанемо

$$L = 2\pi / \sqrt{\omega_1/a} = \delta. \quad (5)$$

У цьому разі послаблення температурної хвилі в матеріалі становить

$$1/k = \exp(-\delta\sqrt{\omega_1/a}) = \exp(-2\pi) = 1/535 \text{ рази}. \quad (6)$$

Подільником напруги 9 встановлюють коефіцієнт ділення k . Тоді напруги, порівнювані на вході диференційного підсилювача 7, можуть бути однаковими, якщо частоту генератора 1 помножити на два в подільнику частоти 8 і затримати в часі ланкою затримки 10. Напруга з виходу підсилювача 7 ділиться за частотою в подільнику 11, випрямляється у фазочутливому випрямлячі 12, який керується напругою генератора 1 і через інтегратор 13 змінює частоту цього генератора так, що автоматично підтримується умова (5).

Для усунення впливу нерівності фазових напливів і коефіцієнтів передач у вимірювальному (ланки 2, 3, 6) та опорному (ланки 8, 9, 10) каналах засобу вимірювання попередньо зрівнюють порівнювані сигнали без контрольованого матеріалу 4. Початкове значення коефіцієнта передачі подільника напруги 9 дорівнює одиниці, а ланцюг автопідналагодження частоти генератора 1 розімкнений. Термосенсор 6 приводять у безпосередній контакт з нагрівачем 3 і, регулюючи коефіцієнт підсилення підсилювача 2 і час затримки ланки 10, дістають нульове значення сигналу на виході диференційного підсилювача 7 на верхній

межі діапазону перестройки частот генератора 1. Подібне зрівняння і в режимі калібрування, і в режимі вимірювання система виконує автоматично.

У режимі вимірювання між нагрівачем 3 і сенсором 6 розташовують контрольований матеріал 4, що спричиняє відповідне послаблення і фазовий зсув температурної хвилі. Коефіцієнт ділення k подільника напруги 9 встановлюють таким, що дорівнює 535 і вмикають систему автоматичного налагодження генератора 1. Оскільки довжина температурної хвилі у цьому разі $L = \delta$, то внесений матеріалом фазовий зсув дорівнює 2π , що не порушує нульову різницю фаз, яку забезпечувала ланка затримки 10 під час калібрування. Із співвідношення (5) видно, що в режимі вимірювання частота генератора 1 однозначно визначає температуропровідність контрольованого матеріалу:

$$a = \delta^2 F_1 / 2\pi, \quad (7)$$

де $F_1 = \omega_1 / 2\pi$ – частота генератора, Гц.

Безпосередньо виміряти температуропровідність матеріалу можна за допомогою додаткового генератора 14, частоту якого встановлюють залежно від товщини контрольованого матеріалу: $F_2 = 2\pi / \delta^2$. Сигнал від генератора 14 надходить на один вхід цифрового частотоміра 15, на другий вхід якого надходить сигнал з виходу подільника частоти 8. Частотомір 15 працює в режимі вимірювання відношення частот вхідних сигналів, його можна відградувати в одиницях температуропровідності:

$$n = F_1 / F_2 = a \quad (8)$$

Температура перегріву ненагрітої поверхні взірця контролюється за допомогою термоперетворювача 6. Вихідний сигнал змінного струму термоперетворювача підсилюється підсилювачем 16 низької частоти і випрямляється фазочутливим випрямлячем 17, на опорний вхід якого з виходу лінії затримки 10 надходить підсилений сигнал подвійної частоти генератора 1. Вихідний сигнал фазочутливого випрямляча 18 реєструється цифровим індикатором температури 19.

Отже, використання описаного методу і пристрою вимірювання, наприклад, при технологічному контролі листових і рулонних діелектричних матеріалів, які, як правило, мають низькі значення коефіцієнтів температуропровідності $a = (0,1-0,8)10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ і вимагають чутливих і точних засобів вимірювань малих коливань температури поверхні, яка не нагрівається, поряд із згаданими у статті методами, дає змогу прямим шляхом отримати шукане значення температуропровідності цих матеріалів з істотно підвищеною точністю за рахунок інваріантності результату вимірювання (див. формули 7, 8) до різних впливових експлуатаційних факторів при частотній компенсації відхилення заданого співвідношення амплітуд температурної хвилі на поверхнях контрольованого матеріалу.

1. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. – М., 1973. 2. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. – М., 1978. 3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М., 1975. 4. Практикум по теплопередаче / А.П. Солодов, Ф.Ф. Цветков, А.В. Елисеев, В.А. Осипова. – М., 1986. 5. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов, С.Е. Буровой, В.В. Куретин и др. – Л., 1986. 6. А.с. 1293606 (СССР) Способ измерения коэффициента температуропроводности материалов и устройство для его осуществления / С.М. Константинов, Ю.А. Скрипник, В.И. Водотовка, В.С. Шевелюк, Л.А. Глазков // Бюл. изобрет. 1987. №8. 7. А.с. 1187047 (СССР) Способ определения коэффициента температуропроводности материалов / В.Ф. Заворотный, Ю.М. Поплавко // Бюл. изобрет. 1985. №39. 8. Филипов Л.П. Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах. – М. 1967.