

7. Богословский В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.
8. Гончаров Э. И. Строительная теплофизика: учебно-методический комплекс [Электронный ресурс] / сост. Э. И. Гончаров и Е. С. Добросольцева; под общ. ред. Э. И. Гончарова. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – Режим доступа: [http://elib.psu.by:8080/bitstream/123456789/11869/2/2\\_-\\_teploperedacha\\_cherez\\_ograzhdenija.pdf](http://elib.psu.by:8080/bitstream/123456789/11869/2/2_-_teploperedacha_cherez_ograzhdenija.pdf).
9. Олійниченко І. Р. Економія при опаленні приміщення за рахунок використання матеріалів, що відбивають теплове випромінювання [Електронний ресурс] / І. Р. Олійниченко // Вісник КНУТД. – 2013. – № 6. – С. 146–149. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vkntud\\_2013\\_6\\_22.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vkntud_2013_6_22.pdf). – Назва з екрана.
10. Линеверг Ф. Измерение температур в технике : справочник / Ф. Линеверг ; под ред. Л. А. Чарихов; [пер. Т. И. Киселева, В. А. Федорович]. — М. : Металлургия, 1980. – 543 с.
11. Więcek B. Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania / B. Więcek, G. De Mey. – F.P. PAK. Krzysztof Przybyła, 2011. – 372 s.

УДК 621

## ТОМОГРАФІЧНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАНЬ ОПОРУ ЛІНІЙНИХ РЕЗИСТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Дорожовець Михайло, Бурдега Мар'яна, 2015

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Проаналізовано можливості реконструкції температурного поля на поверхні стінки томографічним методом за результатами вимірювання опорів лінійних резистивних перетворювачів температури. Опрацьовано модель апроксимації просторового розподілу питомого опору залежно від температури алгебраїчними двовимірними многочленами порядку 4 і 5. Сформовані матриці коефіцієнтів лінійних систем рівнянь, що описують шуканий просторовий розподіл питомого опору чутливих елементів від результатів вимірювань опорів чутливих елементів вздовж лінії їх розміщення на об'єкті дослідження. Моделюванням досліджено якість відтворення просторового розподілу температури томографічним методом з використанням мідних чутливих елементів. Встановлено, що за кількості вимірювань 54 та 96, а також за порядків многочлена 4 і 5 під час відтворення просторового розподілу температури у вигляді косинусної та гауссівської двовимірних моделей середньоквадратична зведена похибка становить від 0.65 % до 1.55 %, а максимальна зведена похибка відтворення – 1.25–9.35 %.*

**Ключові слова:** лінійні резистивні перетворювачі, розподіл температури, томографічний метод.

*Проанализировано возможности реконструкции температурного поля на поверхности стенки томографическим методом по результатам измерения сопротивлений линейных резистивных преобразователей температуры. Обработано модель аппроксимации пространственного распределения удельного сопротивления в зависимости от температуры алгебраическими двумерными многочленами порядка 4 и 5. Сформированы матрицы коэффициентов линейных систем уравнений, описывающих искомое пространственное распределение удельного сопротивления чувствительных элементов вдоль линии их размещения на объекте исследования. Путем моделирования исследовано качество воспроизведения пространственного распределения температуры томографическим методом с использованием медных чувствительных элементов. Установлено, что при количестве измерений чувствительных элементов 54 и 96, а также при порядке многочлена 4 и 5 во время воспроизведения пространственного распределения температуры в виде косинусной и гауссовской моделей среднеквадратичная приведенная погрешность составляет от 0.65 % до 1.55 %, а максимальная приведенная погрешность воспроизведения от 1.25 % до 9.35 %.*

**Ключевые слова:** линейные резистивные преобразователи, распределение температуры, томографический метод.

*In the article the review of measurement problems related to spatial temperature distribution at various industrial facility is carried out. In particular for furnace, rubbish burning stove and walls of building structures. For these measurements acoustic and optical tomography are often used. In particular for spatial temperature distribution at furnace and rubbish burning stove acoustic tomography are used. To measuring the spatial temperature distribution of liquid medium ultrasound tomography is used. The disadvantage of the acoustic tomography is that the trajectory of acoustic waves greatly depended on the temperature distribution of an object. In the case of using screening, these methods aren't used. In this article, the possibilities of reconstruction of temperature field on the surface of the wall using tomography method based on results of measurement of the resistance of linear resistive temperature sensors are analyzed. One of the possible ways of placing of the sensitive elements on the rectangular surface is reviewed (Fig. 1). Fig. 2 shows the generalized line along which the resistance of sensing element can be calculated. The resistance of linear resistive temperature sensors depending on resistivity are presented by equation (3). The resistance of linear resistive temperature sensors along line  $l_j$  except vertical lines are presented can be calculate by equation (5), and resistance for vertical lines can be calculated by equation (6). The approximation of the spatial distribution of resistivity of sensitive elements two-dimensional function is present by equation (7). Coefficients' matrices of systems of linear equations that describe desired spatial distribution of sensitive elements resistance from the results of resistance measurements of sensitive elements along the line of their placement on the subject of research were formed (equation 10). Coefficients' vector of the basic functions were calculated using the method of least squares (equation 12). Approximated spatial temperature distribution can be calculated on the basis of approximation model of the spatial distribution of resistivity (equations 16 and 17). In the article proposed method is investigated for sensitive elements with the following parameters: resistivity  $\rho_0 = 0.01724 \mu\Omega \text{ m}$ , temperature coefficient of resistance  $\alpha = 4.3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , diameter of sensitive element  $d = 0.2 \text{ mm}$  is simulated. The wall size of  $6 \times 6 \text{ m} \times \text{m}$  is investigation. Three approximation models of the temperature distribution in the form of two-dimensional cosine, Gaussian and asymmetrical functions with initial temperature  $\Theta_0 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  and maximal change temperature  $\Theta_m = 75 \text{ }^\circ\text{C}$  are used. For these temperature distributions and set parameters of sensitive elements the measured resistances sensitive elements (equation 21) are calculated. Using simulated results (equation (12) and (7)) the spatial distributions of resistivity are reconstructed. Also the spatial temperature distribution using simulated results is reconstructed (equation (17)) and presented in Fig. 4. The maximum modulo and root mean square characteristics errors of reconstructed temperature are calculated (equation (22), (23)) and presented in table 2. Found, that for 54 and 96 measurement results and for algebraic polynomials 4 and 5 order root mean square error of reconstruction of temperature field varies from 0.65 % to 1.55 % and maximum modulo error of reconstruction of temperature field varies from 1.25 % to 9.35 %. In conclusion, the reconstructed image of temperature depends on the number of linear resistive sensitive elements and also of order of polynomial approximation functions.*

**Key words:** linear resistive transducers, temperature distribution, tomography method.

**1. Вступ.** Вимірювання просторового розподілу температури у промислових та цивільних об'єктах є дуже важливим завданням. Зокрема, для оптимізації процесів спалювання палива з метою отримання належних економічних показників виробництва електроенергії необхідно знати просторовий розподіл у топках котлоагрегатів [1]. Подібно, мінімізація шкідливих викидів під час спалювання сміття в спеціальних печах можлива лише за умови дотримання належного температурного режиму всередині печі [2]. В електронній промисловості для отримання однакових параметрів елементів, що виготовляються на кремнієвих пластинах, а також для зменшення кількості бракованих елементів необхідно контролювати і підтримувати рівномірний розподіл

температури на поверхні кремнієвих пластин [3]. Важливими є дослідження температурних полів на поверхнях і всередині будівельних конструкцій у будівлях та спорудах різного призначення, у яких можуть виникнути пожежі, внаслідок чого під впливом дії високих температур можлива загроза руйнувань конструкцій [4]. Так, під час пожежі в житлових і адміністративних будівлях протягом 1–2 год температура може досягати 1000–1200 °С. Для театральних будівель і великих магазинів вона становить 1100–1200 °С, якщо тривалість пожежі 2–3 год [4]. Щодо промислових будівель, то температура може досягати 1600 °С, коли горять зріджені гази [4]. Границю вогнестійкості конструкцій визначають, зокрема, і за теплоізолювальною здатністю – підви-

щення температури в середньому більше ніж на  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  для поверхонь, що не обігріваються, або на  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  порівняно з температурою конструкції до випробування для будь-якої точки поверхні або більше ніж на  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$  незалежно від температури конструкції до випробування [4].

Отже, об'єктивне визначення середніх і локальних температур всередині і на поверхні різних об'єктів є важливою вимірювальною задачею.

Для вимірювань середніх і локальних температур всередині й на поверхні різних об'єктів використовують різні методи: контактні та безконтактні. Зокрема, для вимірювання розподілу температури на круглих кремнієвих пластинах діаметром 30 см і більше під час виконання технологічних процесів виготовлення мікроелектронних елементів застосовують 32 платинові резистивні чутливі елементи, що розташовані приблизно рівномірно з протилежних сторін пластини [3]. Однак, щоб застосувати чотирьохпроводне підключення перетворювачів до вимірювача опору, необхідно щонайменше 128 дротів. Це істотна незручність цього методу, оскільки на кожний додатковий перетворювач (що необхідно в разі збільшення розміру об'єкта) необхідно чотири додаткові дроти. Крім цього, під'єднані дроти створюють певні перешкоди для одночасного використання досліджень температури поверхні об'єкта іншими методами. Для вимірювання просторового розподілу температури у топках котлоагрегатів та камерах спалювання сміття застосовують методи акустичної томографії [1, 2, 5]. Подібно для вимірювання просторового розподілу температури у рідинному середовищі застосовують методи ультразвукової томографії [6]. Безконтактні акустичні та ультразвукові методи ґрунтуються на залежності швидкості поширення акустичних коливань у середовищі від температури і вимірюванні часових інтервалів поширення акустичних імпульсів між джерелами та приймачами [6]. Однак застосування акустичних методів для вимірювання просторового розподілу температури на поверхні об'єктів пов'язане з тим, що у пристінковій області, вздовж якої поширюються акустичні хвилі, температура може істотно відрізнитися від температури на поверхні самої стінки. Застосування оптичних методів [7] для вимірювання температури на поверхні об'єктів може дати добрий результат у випадках, якщо на оптичному шляху вимірювача немає механічних перешкод для поширення світла. В іншому разі, внаслідок навіть

часткового оптичного екранування досліджуваної поверхні результати вимірювання розподілу температури можуть виявитися недостовірними.

**Метою роботи** є дослідження можливості реконструкції температурного поля на поверхні стінки томографічним методом за результатами вимірювання опорів лінійних резистивних перетворювачів температури, розміщених на досліджуваній поверхні.

**2. Обґрунтування методу вимірювання.** Одним зі способів вимірювання температурного розподілу на досліджуваній поверхні є застосування електричної томографії [5]. У цій томографії просторовий розподіл температури отримують на основі результатів вимірювань електричного опору під час його електричного зондування [8]. Якщо на досліджувану поверхню не можна нанести термочутливий резистивний перетворювач, то одним із способів вирішення цієї проблеми є застосування вимірювальних перетворювачів температури у формі лінійних (дротяних) чутливих елементів (ЧЕ). Як приклад, на рис. 1 показано можливе розміщення чутливих елементів на поверхні досліджуваного об'єкта. Кінці кожного з ЧЕ закріплені на краях досліджуваного об'єкта, так, щоб забезпечити легкий доступ під час вимірювання їх опорів.

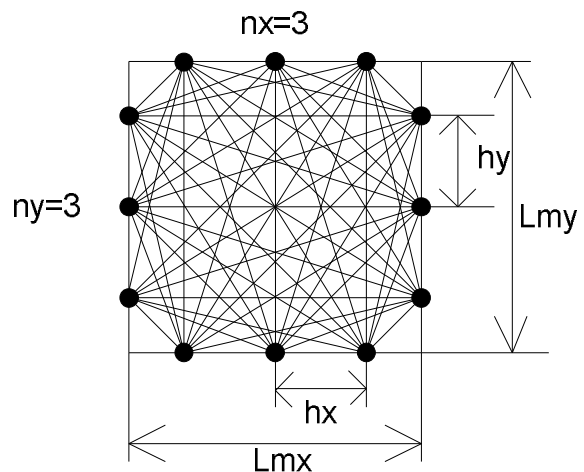


Рис. 1. Можливі розміщення лінійних резистивних чутливих елементів на поверхні прямокутної форми для кількості під'єдань на краях стінки:  $n_x = 3$ ,  $n_y = 3$

Fig. 1. Possible accommodation of linear resistive sensors on the surface of rectangular object for the number  $n_x = 3$ ,  $n_y = 3$  with connections at the edges of wall

Відомо [9], що питомий опір провідників залежить від температури  $\Theta$ :

$$\rho = \rho(\Theta). \quad (1)$$

Якщо помістити лінійний резистивний ЧЕ у середовище з просторовим температурним розподілом  $\Theta(x,y)$ , то питомий опір вздовж дроту, наприклад, вздовж лінії  $l_j$  (рис. 2) буде змінним

$$r(l) = r[\Theta(x, y)]. \quad (2)$$

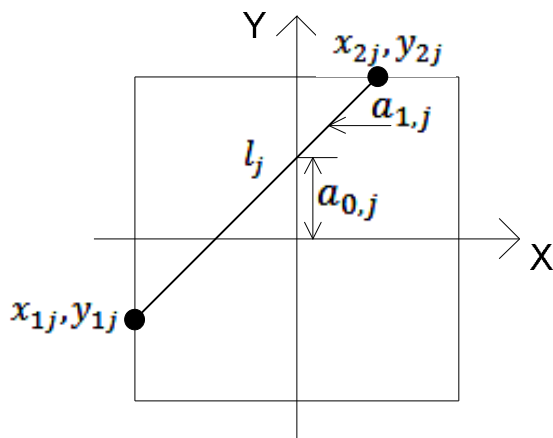


Рис. 2. До визначення опору лінійного резистивного ЧЕ, вздовж якого змінюється температура

Fig. 2. To determine the line resistance (sensitive element) along which temperature is changes

Опір провідника можна обчислити як інтеграл від питомого опору вздовж лінії  $l_j$  :

$$R_j = \frac{1}{S} \int_{l_j} \rho(l) dl, \quad (3)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Якщо просторовий розподіл питомого опору у декартовій системі координат  $(X;Y)$  позначити як  $r(x, y)$ , то, враховуючи, що елементарна довжина у довільному напрямку:

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \sqrt{1 + a_{1j}^2} dx \quad (4)$$

опір вздовж лінії  $l_j$  можна обчислити інтегруванням вздовж однієї координати, у цьому випадку вздовж осі абсцис  $OX$ :

$$R_j = \frac{1}{S} \int_{x_{1j}}^{x_{2j}} r(x, a_{0j} + a_{1j} \cdot x) \cdot \sqrt{1 + a_{1j}^2} dx \quad (5)$$

де  $a_{1j} = \frac{y_{2j} - y_{1j}}{x_{2j} - x_{1j}}$  – коефіцієнт нахилу лінії

$l_j, a_{0j} = y_{1j} - a_{1j} \cdot x_{1j}$  – початкове зміщення цієї лінії.

Якщо  $a_j \rightarrow \infty$  (вертикальна лінія), тоді  $x_{1j} = x_{2j}$  і значення опору можна обчислити звичайним інтегруванням вздовж осі  $OY$ :

$$R_j = \frac{1}{S} \int_{y_{1j}}^{y_{2j}} r(x_{1j}, y) dy. \quad (6)$$

Прийmemo найзагальнішу модель просторового розподілу питомого опору у вигляді лінійних відомих базових функцій  $j_i(x, y)$  [5]:

$$r(x, y) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \varphi_i(x, y), \quad (7)$$

де  $C_i$  – сталі коефіцієнти при базових функціях.

У найпростішому випадку базовими функціями можуть бути алгебраїчні многочлени степеня від 0 до  $n$ , тобто:

$$j_i(x, y) = x^i \cdot y^k, \quad 0 \leq i + k \leq n. \quad (8)$$

За такого розподілу опір лінійного дроту можна обчислити як:

$$R_j = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n C_i \int_{x_{1j}}^{x_{2j}} \varphi_i(x, a_{0j} + a_{1j} \cdot x) \sqrt{1 + a_{1j}^2} dx, \quad (9)$$

$$0 \leq i + k \leq n.$$

Оскільки функції  $j_i(x, y)$  відомі, то інтеграли у (9) у всіх можливих напрямках  $m$  ( $j=1..m$ ) можна обчислити заздалегідь і знайти числові значення (коефіцієнти):

$$\Psi_{ji} = \int_{x_{1j}}^{x_{2j}} \varphi_i(x, a_{0j} + a_{1j} \cdot x) \sqrt{1 + a_{1j}^2} dx = \sqrt{1 + a_{1j}^2} \cdot \int_{x_{1j}}^{x_{2j}} x^l \cdot (a_{0j} + a_{1j} \cdot x)^{i-l} dx \quad (10)$$

Ці коефіцієнти утворюють матрицю  $\Psi$  розміром  $m \times n$ , на основі якої можна записати матричне рівняння для опорів чутливих елементів:

$$\mathbf{R} = \frac{1}{S} \cdot \Psi \cdot \mathbf{C}, \quad (11)$$

де  $\mathbf{C}$  – вектор (розмірністю  $n$ ) коефіцієнтів при базових функціях,  $\mathbf{R}$  – вектор (розмірністю  $m$ ) опорів провідників.

На підставі результатів відтворення розподілу температури за результатами вимірювання опорів чутливих елементів (вектор  $\mathbf{R}_{meas}$ ), застосовуючи метод

найменших квадратів, можна обчислити вектор коефіцієнтів  $\mathbf{C}$  за виразом [5]:

$$\mathbf{C} = (\Psi^T \cdot \Psi)^{-1} \cdot \Psi^T \cdot \mathbf{R}_{meas} \cdot S. \quad (12)$$

Підставляючи ці коефіцієнти до залежності (7), можна обчислити прийнятну апроксимацію розподілу питомого опору.

Якщо питомий опір ЧЕ є функцією  $F(\cdot)$  розподілу температури  $\Theta(x, y)$ , тобто:

$$\rho(x, y) = F[\Theta(x, y)], \quad (13)$$

то шуканий результат розподілу температури можна знайти як обернену функцію:

$$\Theta(x, y) = F^{-1}[\rho(x, y)] = F^{-1}\left[\sum_{i=1}^n C_i \cdot \psi_i(x, y)\right] \quad (14)$$

Наприклад, якщо залежність питомого опору від температури  $\Theta$  лінійна, як для мідних ЧЕ [9]:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Theta), \quad (15)$$

де  $\rho_0$  – питомий опір за температури  $\Theta = 0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт, то обернена функція у цьому випадку теж лінійна:

$$\Theta = \frac{\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)}{\alpha}, \quad (16)$$

і тоді шукану апроксимацію просторового розподілу температури можна обчислити за таким виразом:

$$\Theta_a(x, y) = \frac{\left[\frac{S}{\rho_0} \sum_{i=1}^n C_i \cdot \psi_i(x, y) - 1\right]}{\alpha}. \quad (17)$$

**3. Результати досліджень.** Дослідження виконано на основі моделювання: прийнято матеріал чутливих елементів мідь з питомим опором за температури  $0^\circ\text{C}$ :  $\rho_0 = 0.01724$  мкОм·м, температурний коефіцієнт зміни опору:  $\alpha = 4.3 \cdot 10^{-3}$  1/°C [9], діаметр дроту ЧЕ  $d = 0.2$  мм, тоді площа поперечного перерізу  $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ .

Об'єкт має розміри  $L_{mx} = 6$  м,  $L_{my} = 6$  м. Для виконання початкових досліджень розподіл температури [5] прийнято у вигляді двовимірної косинусоїди (рис. 3, а), у

$$\begin{aligned} R_{meas} &= \frac{\rho_0}{S} \int_{x_{1j}}^{x_{2j}} \left( 1 + \alpha \cdot \left( \Theta_0 + \Theta_m \cdot \cos p \left( \frac{x}{L_{mx}} \right) \cdot \cos p \left( \frac{a_{0j} + a_{1j} \cdot x}{L_{my}} \right) \right) \sqrt{1 + a_{1j}^2} \right) dx = \\ &= \frac{\rho_0}{S} \left[ (1 + \alpha \cdot \Theta_0) \cdot l_j + \alpha \cdot \Theta_m \int_{x_{1j}}^{x_{2j}} \cos p \left( \frac{x}{L_{mx}} \right) \cdot \cos p \left( \frac{a_{0j} + a_{1j} \cdot x}{L_{my}} \right) \sqrt{1 + a_{1j}^2} dx \right] \end{aligned} \quad (21)$$

де  $l_j = \sqrt{(y_{2j} - y_{1j})^2 + (x_{2j} - x_{1j})^2}$  – довжина  $j$ -го чутливого елемента.

формі двовимірної гауссівської поверхні (рис. 3, б) та двомодального розподілу (рис. 3, в)

$$\Theta(x, y) = \Theta_0 + \Theta_m \cdot \cos \left[ p \cdot \frac{x}{L_{mx}} \right] \cdot \cos \left[ p \cdot \frac{y}{L_{my}} \right]; \quad (18)$$

$$\Theta(x, y) = \Theta_0 + \Theta_m \cdot e^{-\frac{\left(\frac{2 \cdot x}{L_{mx}}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot y}{L_{my}}\right)^2}{b^2}}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Theta(x, y) &= \Theta_0 + \Theta_m \cdot e^{-\frac{\left(\frac{2 \cdot x - b}{L_{mx}}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot y - f}{L_{my}}\right)^2}{b^2}} + \\ &+ \Theta_{m1} \cdot e^{-\frac{\left(\frac{2 \cdot x - b1}{L_{mx}}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot y - f1}{L_{my}}\right)^2}{b^2}}, \end{aligned} \quad (20)$$

де  $\Theta_0 = 100^\circ\text{C}$  – початкова температура,  $\Theta_m = \Theta_{m1} = 75^\circ\text{C}$  – максимальна зміна температури,  $\beta = 1$  – параметр ширини розподілу,  $b = 0.4, f = 0.4, b1 = -0.4, f1 = -0.4$  – параметри зміщення (асиметрії) моделі температурного розподілу, а аргументи змінюються в

межах:  $0 \leq |x| \leq \frac{L_{mx}}{2}, 0 \leq |y| \leq \frac{L_{my}}{2}$ . Подальші дослідження виконано для різної кількості ЧЕ, яка залежить від кількості точок їх підключення на краях об'єкта:  $k = 3, k = 4$ , а також різного порядку апроксимованих многочленів:  $p = 4$  і  $p = 5$ .

Якщо на кожній стороні регулярно (з рівномірним віддаленням) розташовано по  $k$  точок, в околі яких розміщені кінці ЧЕ, тоді всього можна отримати  $m = 6 \cdot k^2$  результатів вимірювання опорів. Тоді для  $k = 3$  отримаємо  $m = 54$ , а для  $k = 4$  відповідно  $m = 96$ .

До відтворення температури застосовано двовимірні алгебраїчні многочлени (7) з максимальним степенем  $p = 4$  і  $p = 5$ , тобто у моделі (7) кількість членів становить  $n = (p+1) \cdot (p+2) / 2$ , так, для  $p = 4$  отримаємо  $n = (4+1) \cdot (4+2) / 2 = 15$ , а для  $p = 5$  відповідно  $n = (5+1) \cdot (5+2) / 2 = 21$ .

Моделльні результати вимірювань опорів отримано за виразом (5), враховуючи (18), тобто:

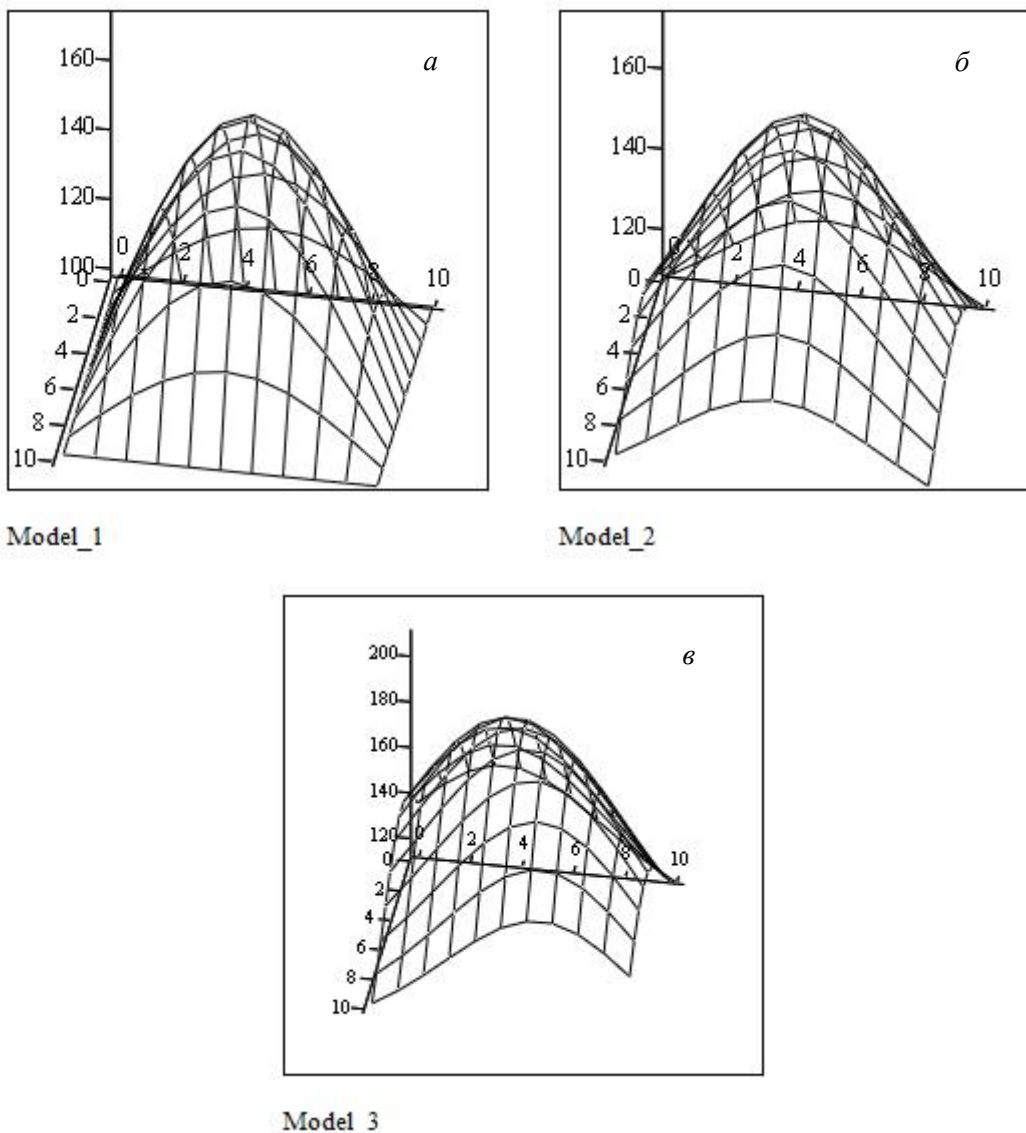


Рис. 3. Двовимірні моделі розподілу температури: косинусна (а), гауссівська (б), зміщена (асиметрична) (в)  
 Fig. 3. The two-dimensional models of temperature distributions: cosine (a), Gaussian (b), asymmetrical (v)

Аналогічний вираз отримано для розподілу температури у вигляді двовимірної гауссівської поверхні (19).

Підставивши значення (21) до (11), отримали значення коефіцієнтів  $C$  (для  $k = 3$  і  $p = 4$  подано у табл. 1)

Таблиця 1

Сталі коефіцієнти при базових функціях

Table 1

Constant coefficients of the base functions

0	1	2	3	4	5	6	
1.708	0	0	-0.041	0	-0.041	0	
7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	0	$6.899 \cdot 10^{-4}$	0	$4.442 \cdot 10^{-3}$	0	$6.899 \cdot 10^{-4}$

Відтворені за (17), (18), (19) та (20) розподіли температури показано на рис. 4 а, б і в відповідно.

Для оцінювання якості відтворення температури використано зведену (у відсотках) похибку відтворення температури, обчислену як:

$$\gamma_{\Theta}(x, y) = \frac{\Theta_a(x, y) - \Theta_m(x, y)}{\Theta_0 + \Theta_m} \cdot 100\%, \quad (22)$$

її середньоквадратичне значення :

$$\gamma_{скз} = \sqrt{\frac{1}{Lmx \cdot Lmy} \cdot \int_{-Lmx}^L \int_{-Lmy}^L \gamma^2_{\Theta}(x, y) dx dy}; \quad (23)$$

та максимальне за модулем значення зведеної похибки:  $|\gamma_{\Theta}(x, y)|_{max}$

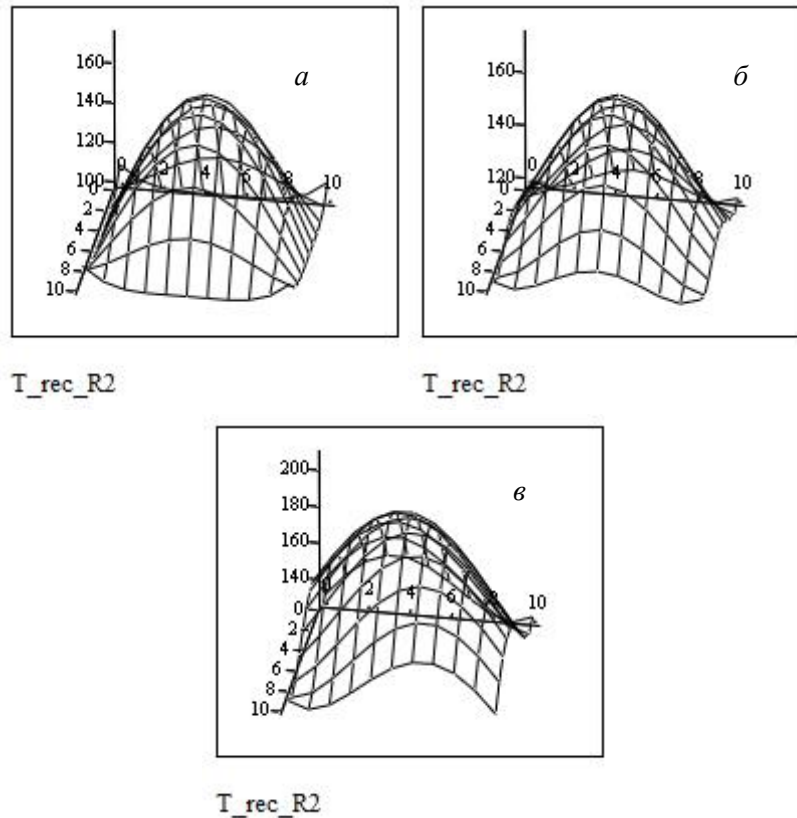


Рис. 4. Відтворені розподіли температури для  $k=3$  і  $n=15$ : а – для моделі (18); б – для моделі (19); в – для моделі (20)

Fig. 4. Reconstructed temperature distributions for  $k=3$  and  $n=15$ : a – of model (18); b – of model (19); c – of model (20)

У табл. 2 наведені максимальні за модулем та середньоквадратичні значення похибки відтворення

температури для різної кількості чутливих елементів та порядків апроксимації многочленів.

Таблиця 2

Максимальні за модулем та середньоквадратичні значення зведеної похибки відтворення температури, %

Table 2

The maximum modulo and root mean squared reconstructed temperature errors, %

Модель	k=3				k=4			
	p=4		p=5		p=4		p=5	
	$\gamma_{скз}$	$ \gamma_{\Theta}(x, y) _{\max}$	$\gamma_{скз}$	$ \gamma_{\Theta}(x, y) _{\max}$	$\gamma_{скз}$	$ \gamma_{\Theta}(x, y) _{\max}$	$\gamma_{скз}$	$ \gamma_{\Theta}(x, y) _{\max}$
1 (18)	1.33	5.96	1.33	5.96	0.68	1.37	0.68	1.37
2 (19)	1.33	5.85	1.33	5.85	0.65	1.25	0.65	1.25
3 (20)	1.55	9.35	1.55	9.35	0.82	2.25	0.82	2.25

Для зменшення цієї похибки необхідно збільшити кількість результатів вимірювання опорів, тобто кількість чутливих елементів.

**4. Висновки.** Як показують отримані результати, використовуючи лінійні чутливі елементи у вигляді резистивних дротів, питомий опір яких залежить від

температури, застосовуючи томографічну реконструктивну техніку, можна відтворити просторовий розподіл температури.

Якість відтворення образу температури залежить від кількості лінійних чутливих елементів та порядків відтворюваних многочленів. Подальші дослідження стосуються встановлення вимог до інструментальної

частини вимірювальної системи, зокрема щодо точності вимірювання опорів, а також встановлення умов досягнення стабільності відтвореного температурного розподілу в разі впливу під час вимірювань випадкових та регулярних шумів та завад.

1. CODEL. *Акустична томографічна система вимірювання температурного поля в точках котлоагрегатів: Проспект фірми Combustion Development Ltd. Bakewell, Derbyshire, UK, 1994.* 2. Doster M. und Hentshel G. *Die akustische Gastemperaturmesttechnik ein automatisches, berührungsslose Mesverfahren. VDI/VDE-Gessellschaft Mess-und Automatisierungstechnik, "Temperature 92". – Dusseldorf, 1992. – P. 169–177.* 3. Parker J., Renken W. *Temperature Metrology for CD Control in DUV Lithography // Semiconductor International. Cahners Publishing, Netherlands. Sept. 1997. – P. 111–116.* 4. Милованов А. Ф. *Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.* 5. Дорожовець М. М.

*Томографічні вимірювання просторового розподілу фізичних величин на прикладах електричної та акустичної томографії: дисертація доктора технічних наук. – Львів, 2001. – С. 38–51.* 6. Basarab-Horwath I., Dorozhovets M.M. *Measurement of the Temperature Distribution in Fluids Using Ultrasonic Tomography. – New York, Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1994 IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, Vol.3, P. 1891–1894. 1994.* 7. *Енциклопедія термометрії / Луцик Я. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2003. – 428 с.* 8. Дорожовець М. М., Петровська І. Р. *Дослідження методичних похибок вимірювання в електричній томографії // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2007. – № 67. – С. 13–18.* 9. *Засоби та методи вимірювання неелектричних величин: підручник / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, Б. І. Стадник, О. В. Івахів, Т. Г. Бойко, А. Ковальчик; за ред. Є. С. Поліщука. – Львів: Бескид Біт, 2008. – 618 с.*