

Отримані результати свідчать про істотний внесок вихорового механізму в сумарну фізичну дію на оброблюване середовище та можуть стати основою для розробки рекомендацій із удосконалення роторно-пульсаційних апаратів.

1. Долинский А.А., Басок Б.И. и др. *Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях.* — К., 1996. 2. Накорчевский А.И., Басок Б.И. *Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках.* К., — 2002. 3. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Кравченко Ю.С., Пироженко И.А. *Экспериментально-аналитическая модель динамики жидкости в роторно-пульсационном аппарате // Доповіді НАНУ.* — 2003, — № 10. — С. 90—96.

УДК 536.2.083

І. Васильківський, Я. Юсик, Р. Наконечний
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ МОСТОВОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

© Васильківський І., Юсик Я., Наконечний Р., 2004

Brought theoretical motivation of building of instrument for measurement heat conductivity on base bridge thermal measuring scheme, as well as brought description of principle developing instrument scheme and results of experimental researches.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими практичними завданнями. В сучасній фізиці твердого тіла основним способом отримання інформації про теплофізичні властивості речовин залишається експеримент. Це пояснюється тим, що розрахункові методи не завжди забезпечують необхідну точність (похибка до 20 %), а для розрахунків потрібний такий обсяг вихідних даних, одержання яких є складнішим від прямого вимірювання шуканої величини.

Серійний випуск приладів для вимірювання теплопровідності в Україні не налагоджено, хоча відомі є розробки відділу теплотрії Інституту технічної теплофізики НАН України і інших організацій [1, 2]. Все це створювало і сьогодні створює великі труднощі як у плані реалізації вимірювання теплопровідності матеріалів, так і у метрологічному забезпеченні цих вимірювань. Отже, розробка та дослідження теплової мостової схеми вимірювання теплопровідності, і як результат нового теплофізичного приладу, досконалішого порівняно з відомими, надзвичайно актуальна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомих розробках теплофізичних приладів підвищення точності вимірювання досягалося через вдосконалення методик вимірювань, технологій виготовлення і конструкцій існуючих приладів [3, 4, 5]. Для досягнення їх нечутливості до неінформативних параметрів використовують методи параметричної стабілізації (конструкторсько-технологічні), які реалізуються за допомогою використання вузлів та елементів покращеної якості і стабільності (охоронні нагрівачі, складну систему теплових екранів, високоточні термопари з електродами зменшеного діаметра тощо) Однак ці заходи призводять до значного подорожчання та ускладнення приладів і не дають змоги значно підвищити точність теплофізичних вимірювань.

Мета дослідження — створення на базі розроблених нами методологічних підходів [6, 7] теплової мостової вимірювальної схеми з огляду на забезпечення мінімізації похибок, спричинених впливом зовнішніх неінформативних параметрів, що дасть можливість підвищити точність і надійність теплофізичного приладу.

Побудова приладів на основі зрівноважених теплових мостових вимірювальних схем дає змогу підвищити точність вимірювання теплопровідності за рахунок зменшення похибок, що вносять в шукану величину температурні вимірювання, а також компенсації впливу різних збурень. Принципова

схема одного із розроблених на цій основі вимірювача теплопровідності матеріалів [10] наведена на рис. 1, а схема, з'єднання теплових опорів в ньому — на рис. 2.

Вимірюють теплопровідність так. Досліджуваний 3 і порівнюваний 4 зразки поміщають на торці мідних елементів 5 і притискають до них з допомогою приймачів теплоти і механізмів 7. Приймачі теплоти виконані у вигляді теплообмінних камер, в яких циркулює теплоносій зі сталою температурою, заданою термостатом 8. Електричний нагрівач 1 є джерелом теплового потоку, який розподіляється теплопровідним елементом (ТЕ) 2 між досліджуваним 3 та порівнюваним 4 зразками. Нагрівач переміщується по ТЕ доти, доки в стаціонарному тепловому режимі сигнал диференційної термопари 9, спаї якої вмонтовані в мідні елементи 5, не дорівнюватиме нулю, що контролюється з допомогою нуля-індикатора 10. Після цього зі шкали 11 зчитують значення відхилення нагрівача відносно середини або торця ТЕ і за цим значенням визначають шукану величину.

На основі законів Кірхгофа для теплових кіл запишемо умову рівнянь для зрівноваженої теплової вимірювальної схеми, складеної з теплових опорів, елементів, відповідно до рис. 2.

$$\begin{cases} \dot{O}_1 \cdot R_1 - \dot{O}_2 \cdot R_2 = \Delta T_{\dot{a}\dot{a}} \\ \dot{O}_1 \cdot R_{\dot{o}} - \dot{O}_2 \cdot R_{\dot{a}} = \Delta T_{\dot{a}\dot{a}} \\ \Delta T_{\dot{a}\dot{a}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де Φ_1, Φ_2 — теплові потоки, що проходять в колах досліджуваного і еталонного зразка, відповідно; R_1, R_2 — теплові опори частин ТЕ від нагрівача до торців ТЕ з боку досліджуваного і порівняльного зразка, відповідно; R_x, R_e — теплові опори досліджуваного і порівняльного зразка, відповідно; $\Delta T_{\dot{a}\dot{a}}$ — різниця температур між точками а і б (в діагоналі мостової теплової вимірювальної схеми).

Із системи рівнянь (1) одержуємо формулу для визначення теплового опору досліджуваного зразка:

$$R_x = R_e \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

Враховуючи, що тепловий опір елемента теплового кола визначається як [8]:

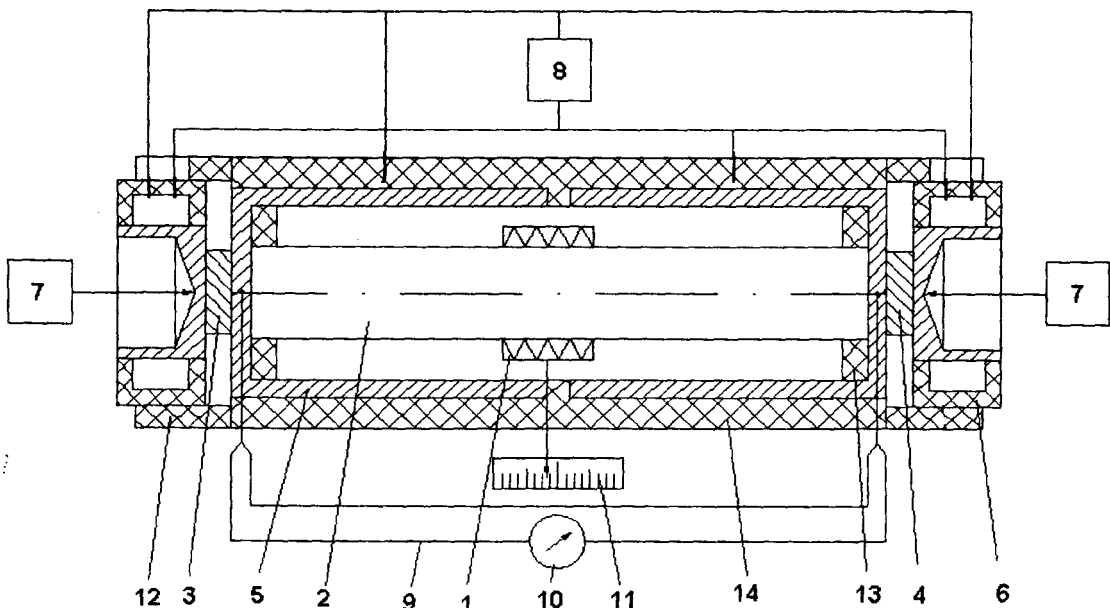


Рис. 1. Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності матеріалів:

- 1 — джерело тепла; 2 — теплопровідний елемент (ТЕ); 3 — досліджуваний зразок;
 4 — порівняльний зразок; 5 — мідні температуровимірювальні елементи; 6 — приймачі теплоти;
 7 — механізм притискування; 8 — термостат; 9 — диференційна термопара; 10 — нуля-індикатор;
 11 — шкала; 12 — теплоізоляційні муфти; 13 — центральні теплоізоляційні вставки; 14 — кожух

$$R = \frac{l}{\lambda \cdot S}$$

де λ — теплопровідність; l, S — довжина і площа поперечного перерізу елемента, отримуємо формулу для визначення теплопровідності досліджуваного зразка:

$$\lambda_x = \lambda_e \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{S_e}{S_x} \cdot \frac{l_x}{l_e} \quad (3)$$

де l_1, l_2 — довжина частини ТЕ від нагрівача до торців з боку досліджуваного і порівняльного зразків, відповідно; індекси “x”, “e” визначають належність до досліджуваного та порівняльного зразка, відповідно.

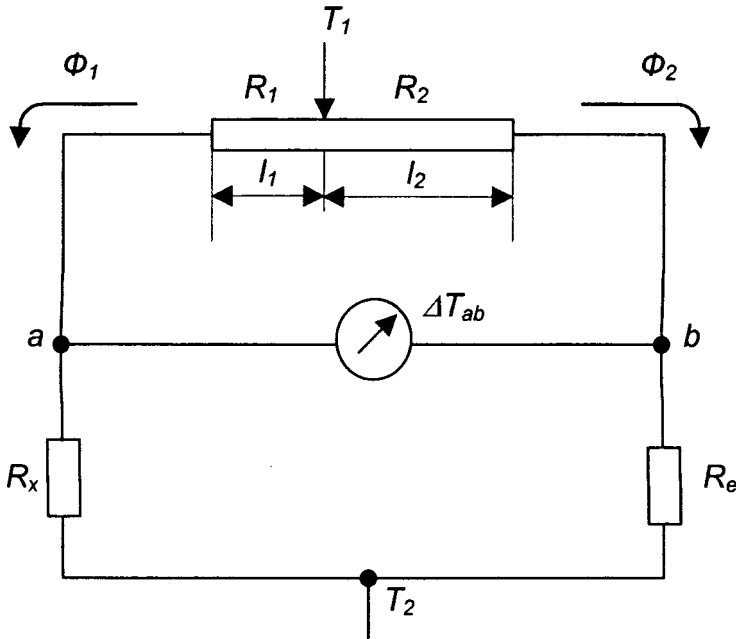


Рис. 2. Схема з'єднання теплових опорів та розподілу теплових потоків і температур у мостовій тепловій вимірній схемі

Аналіз роботи вимірювача теплопровідності, побудованого на базі зрівноваженої мостової вимірної схеми, показує, що у цьому пристрої усуваються похибки, що вносяться вимірюваннями абсолютних значень температур і їх різниць, а також коливаннями температур джерела і приймача теплоти [6]. Однак тепла виміривальна схема (рис. 2), побудована за аналогією з електричними мостовими виміривальними схемами, не враховує особливостей теплообміну між елементами теплового кола, а саме: не враховано вплив контактної теплової опору (КТО) між окремими елементами, який при дослідженні зразків з малими значеннями теплових опорів може бути доволі значним. Система рівнянь (1) для теплової виміривальної схеми не враховує також розсіювання теплоти з бокових поверхонь ТЕ, досліджуваного і порівняльного зразків.

Для оцінки похибки вимірювання теплопровідності, пов'язаної з цими впливами, і визначення найкращих режимів роботи приладу, розглянемо математичну модель теплового блока, побудовану на основі теорії теплопровідності. Прийнято такі умови: температури поверхонь досліджуваного і порівняльного зразка з боку приймачів тепла однакові і підтримуються сталими за допомогою термостата; перепади температур на досліджуваному та порівняльному зразках не однакові і ця різниця визначається впливом КТО і похибкою вимірювання нульової різниці температур.

Характер розподілу температур в елементах теплового кола мостової теплової виміривальної схеми наведено на рис. 3. Приймаючи напрям координати X від торця ТЕ до нагрівача, розподіл температури по частинах ТЕ в стаціонарному тепловому режимі, з урахуванням розсіювання теплоти з бокових поверхонь схеми, можна задати рівнянням [9]:

$$\vartheta_{1,2}'' - 4m_{1,2}^2 \cdot \vartheta_{1,2} = 0 \quad (4)$$

і граничними умовами:

$$Z = 0; \quad \vartheta_{1,2}' = 4m_{1,2}^2 \cdot N_{1,2}; \quad \vartheta_{1,2} = \theta_{1,2}. \quad (5)$$

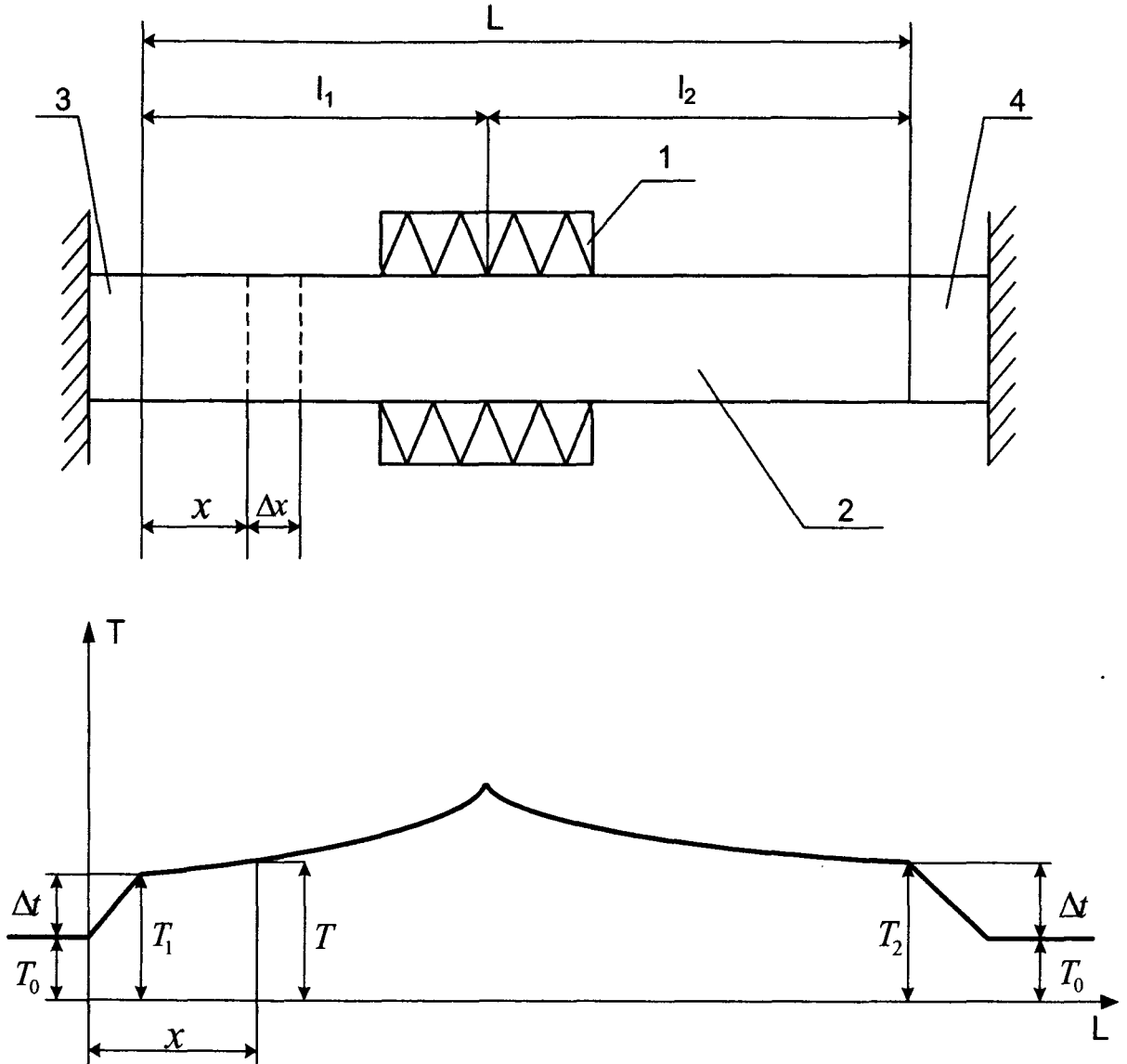


Рис. 3. Характер розподілу температур в елементах теплового кола мостової теплової виміральної схеми

Прийнято такі позначення:

$$\vartheta_{1,2} = \frac{T_{1,2}}{T_c}; \quad m_{1,2}^2 = \frac{\alpha \cdot l_{1,2}}{d \cdot \lambda}; \quad \theta_{1,2} = \frac{T_0 - T_c + \Delta T_{x,e}}{T_c} \quad (6)$$

$$N = \frac{\Delta T_{x,e}}{\pi \cdot l_{1,2} \cdot \alpha \cdot d \cdot T_c \cdot R_{x,e}}; \quad Z = \frac{x}{l_{1,2}}$$

де T — температура ТЕ в перерізі з координатою x ; T_c — температура зовнішнього середовища; T_0 — температура рідини в термостаті; α — коефіцієнт тепловіддачі з бокових поверхонь зразків і ТЕ; λ — теплопровідність ТЕ; d — діаметр ТЕ; індексами “1” і “2” позначено належність до частини ТЕ з боку досліджуваного і порівняльного зразків, відповідно.

Розв'язання рівняння (4) при граничних умовах (5) має вигляд [9]:

$$\vartheta_{1,2} = \theta_{1,2} \operatorname{ch}(2m_{1,2}) + 2m_{1,2} \cdot N_{1,2} \operatorname{sh}(2m_{1,2}) \quad (7)$$

Зважаючи на те, що в перерізі ТЕ з координатою $Z = 1$ розв'язки (7) прирівнюються за температурою, тобто при $Z=1$, $\vartheta_1 = \vartheta_2$ отримаємо:

$$\theta_1 \operatorname{ch}(2m_1) + 2m_1 \cdot N_1 \cdot \operatorname{ch}(2m_1) = \theta_2 \operatorname{ch}(2m_2) + 2m_2 \cdot N_2 \cdot \operatorname{ch}(2m_2) \quad (8)$$

Спростимо цей вираз, розклавши його в ряд по степенях $2m$ і враховуючи, що $2m \ll 1$. Остання умова тим більш справедлива, чим більша теплопровідність ТЕ. Після розкладу і обмеження квадратними членами одержимо:

$$m_1^2 (\theta_1 + 2N_1) = m_2^2 (\theta_2 + 2N_2) \quad (9)$$

Враховуючи співвідношення (3), отримаємо:

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{\theta_1 + 2N_1}{\theta_2 + 2N_2}} \quad (10)$$

Позначимо перепад температури на досліджуваному зразку: $\Delta t_x = \Delta t$, перепад температури на порівняльному зразку: $\Delta t_e = \Delta t(1 - \psi)$, де ψ — параметр, що враховує вплив КТО і похибку вимірювання нульової різниці температур.

Перетворюємо співвідношення (10) з урахуванням прийнятих позначень, в результаті чого отримаємо вираз для розрахунку теплопровідності досліджуваного зрізця:

$$\lambda_x = \lambda_e \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{S_e}{S_x} \cdot \frac{l_x}{l_e} \left\{ 1 + \frac{\pi \cdot d \cdot \alpha \cdot L \cdot R_e}{2} \left(1 - \frac{l_1}{l_2} \right) \left(1 + \frac{\Delta T}{\Delta t} \right) + \psi \left[1 + \frac{\pi \cdot d \cdot \alpha \cdot l_2 \cdot R_e}{2} \left(1 + \frac{l_1^2}{l_2^2} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

де $\Delta T = T_0 - T_c$, L — повна довжина ТЕ.

Аналізуючи формулу (11), ми бачимо, що вона відрізняється від (4) виразом у фігурних дужках. Причому другий член цього виразу характеризує вплив на результат вимірювання розсіювання теплоти з бокової поверхні ТЕ, а третій член — вплив КТО в комплексі з фактором розсіювання теплоти.

Формула (11) дає змогу оцінити максимальну похибку вимірювання теплопровідності, спричинену вказаними впливами. Крім того, ми маємо можливість зменшити похибку вимірювання з допомогою суто конструктивних розв'язків.

Так, наприклад, із (11) видно, що при $\alpha = 0$ на результат вимірювання впливають лише КТО. Цього самого результату ми досягаємо при виконанні умов:

$$R_x = R_e; \quad \Delta T = 0$$

Виконання умови $R_x = R_e$ досягають, підбираючи зразки так, щоби зрівноваження схеми відбувалося при положенні нагрівача приблизно посередині ТЕ, тобто якщо $l_1 \approx l_2$.

Для підтримання рівності температур стоків теплоти і зовнішнього середовища ($\Delta T = T_0 - T_c = 0$) конструкція приладу розроблена так, що ТЕ закритий кожухом 14, через який пропускають рідину із термостата 8 з температурою, що дорівнює температурі приймачів теплоти 6. Бокові поверхні досліджуваного 3 і порівняльного 4 зразків захищені тепловою ізоляцією 12. ТЕ центрується відносно кожуха 14 за допомогою центральних теплоізоляційних вставок 13.

Вплив КТО на результат вимірювання значно зменшують, градууючи прилад за допомогою набору зразків однакового діаметра і різної товщини, виготовлених із одного матеріалу (органічного скла або сталі 12Х18Н10Т). Тоді співвідношення між тепловими опорами і-го та j-го зразків набору дорівнює:

$$\frac{R_i}{R_j} = \frac{h_i}{h_j} \quad (12)$$

Отже, використовуючи один із зразків в якості досліджуваного, а другий в якості порівняльного, отримані статичні характеристики приладу (рис. 4).

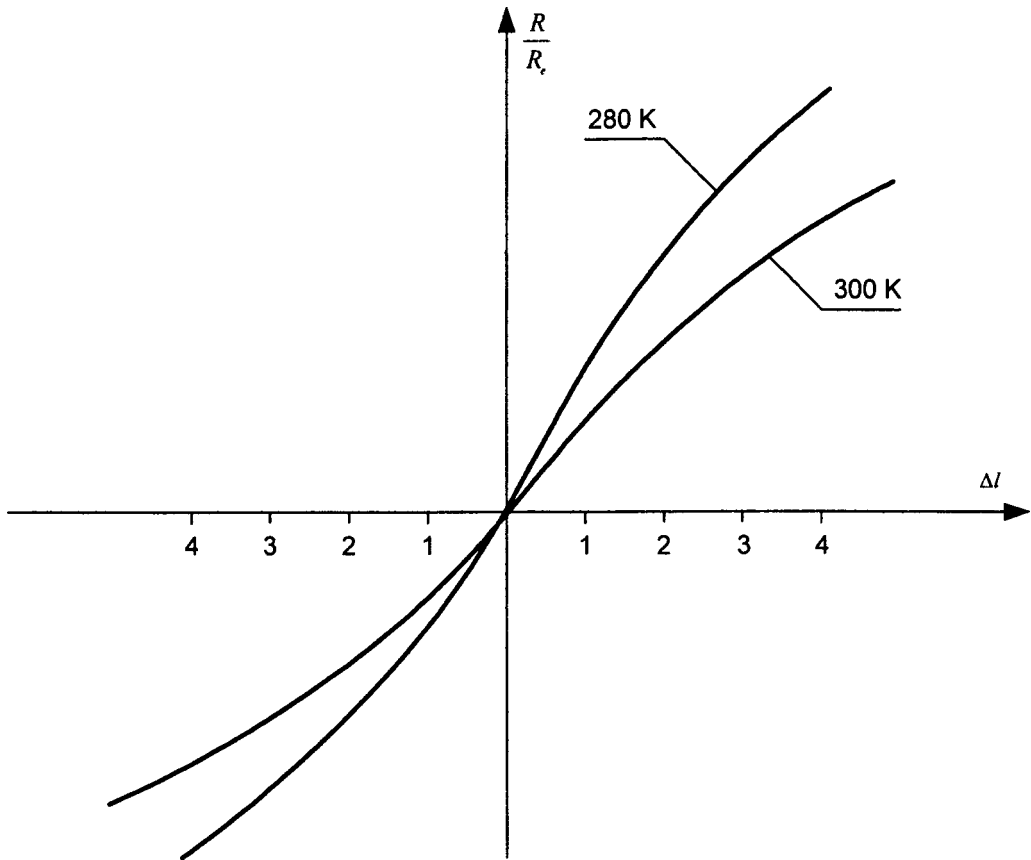


Рис. 4. Статичні характеристики приладу при різних значеннях температури

Експериментальні дослідження, виконані за допомогою цих наборів зразків, показали, що в діапазоні від 0,2 до 10 Вт/м·К при температурах 270—370 К основна похибка вимірювання приладу, з урахуванням похибки зразкової міри теплопровідності, становить не більше від 5 %, при довірчій ймовірності 0,95.

Висновки. Отже, дослідження впливу неінформативних параметрів на розроблену теплову вимірювальну схему дасть змогу забезпечити інваріантність вихідного сигналу цієї схеми до впливу неінформативних параметрів і тим самим підвищити точність вимірювання за рахунок мінімізації похибок, спричинених впливом цих параметрів.

1. Геращенко О.А., Грищенко Т.Г. Приборы для теплофизических измерений. Каталог. К., 1991. 2. Теплофизические измерения и приборы. Под общей ред. Е.С.Платунова. — Л., 1986. 3. Буравой С.Е., Олейник Б.Н. Современное состояние и проблемы метрологического обеспечения теплофизических измерений // Измерительная техника, 1987, № 5. — С. 28—30. 4. Сергеев О.А. Метрология и средства измерений тепловых величин. Итоги науки и техники ВИНТИ // Метрология и измерительная техника, 1982, 2, № 5. — С. 179—223. 5. Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. — М., 1972. 6. Пистун Е.П., Рогоцкий Я.Т., Васильковский И.С. Повышение точности измерения теплопроводности на основе принципа инвариантности // Респ. міжвід. науково-техн. зб.: Контрольно-измерительная техника. 1989. Вып. 45. — С. 29—32. 7. Васильковский И.С. Структурные методы повышения точности измерения теплофизических свойств веществ // Теплоэнергетические системы и устройства // Вісн. Львів. Політехн. ін-ту, № 227. — Львів, 1988. — С. 9—11. 8. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. — М., 1984. 9. Исаченко В.П., Осипова В.А. Сукомел А.С. Теплопередача. — М., 1981. 10. Рогоцкий Я.Т., Пистун Е.П., Васильковский И.С. А.С. 1376021 СССР. Способ измерения теплопроводности веществ // Бюл. изобрет. 1988, № 7.