

межах заданого часу $L/a < t < (L/a) + \pi/\beta$ імпульси переміщення поверхні торця, генеровані у короткому стрижні за одноразового поздовжнього удару кулькою.

1. Дейвис Р.М. Волны напряжений в твёрдых телах. – М., 1955. 2. Кольский Г. Волны напряжений в твёрдых телах. – М., 1955. 3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М., 1975. 4. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. – М., 1965. 5. Жарий О.Ю., Улитко А.Ф. Введение в механику нестационарных колебаний и волн. – К., 1989. 6. Hunter S.S. Energy absorbed by elastic waves during impact // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1957. – Vol. 5. – P. 162-171. 7. Марочник сталей для машиностроения. – ОМТМ, М., 1965. 8. Марочник сталей. – М., 1961. 9. ГОСТ 21616-91. Тензорезисторы. Общие технические условия. – М. 10. Большакова И.А., Гортынская И.Д., Подстригач И.Я., Сиверс С.Р. Ис-

следование динамических характеристик германиевых тензорезисторов в импульсном режиме // *Измерительная техника*, 1991. – № 3. – С. 16-17. 11. Патент 19120 України МКІ G01b7/18 Пристрій для динамічного градування тензорезисторів. 12. Евтушенко А.А., Сиверс С.Р. Экспериментальное устройство для динамической градуировки тензорезисторов // *Заводская лаборатория*, 1999. – № 6. – С. 59-62. 13. Шушкевич В.А. Основы тензометрирования. – Минск, 1975. 14. Сиверс Світлана. Вимірювання деформацій в імпульсному режимі // *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур*. – т. 2 – Львів, 2000. – С. 267-269. 15. Taylor D.A.W. Time and amplitude errors in the measurement of dynamical strain pulses by resistance strain gages // *International Journal of Mechanical Science*. – 1966. – Vol. 8. – P. 193-212. 16. Анкундинов Д.Т., Мамаев К.Н. Малогазные тензодатчики сопротивления. – М., 1968.

УДК 621.437

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ

© Стадник Богдан^{1,2}, Яцук Юрій¹, Франк Бернгардт³, 2006

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

²Ряшівська політехніка, Ряшів, вул. В. Поля, 2, Польща

³Технічний університет Ільменау, Німеччина

Порівняні методи визначення геометричних розмірів чутливих елементів резистивних сенсорів температури. Теоретично та експериментально показано переваги методу досліджень з саморозігріванням чутливого елемента.

Выполнено сравнение методов определения геометрических размеров чувствительных элементов резистивных сенсоров температуры. Теоретически и экспериментально показано преимущество метода исследований с саморазогревом чувствительного элемента.

The temperature sensors geometric dimensions comparisons are made in this paper. By experimental and theoretical investigation ways are shown advantages of temperature sensors self-heating method.

1. Вступ. Відомо, що метрологічні характеристики сучасних промислових термометрів переважно визначаються параметрами первинних вимірювальних перетворювачів температури. Це зумовлено тим, що внаслідок відомих технологічних та економічних причин сучасні серійні промислові сенсори температури мають істотний початковий розкид характеристик та невисоку часову стабільність в умовах експлуатації [1-4]. Наприклад, навіть для найточнішого із серійних сенсорів – платинових термоперетворювачів опору (ТО) класу А за температур декілька сотень градусів Цельсія межа допустимих

значень похибки може сягати $\pm 1,5$ К. Незважаючи на значні зусилля вчених, спрямовані на пошук нових матеріалів, покращання технології їхнього виготовлення, розроблення захисної арматури тощо, сьогодні не спостерігається істотного підвищення метрологічних характеристик сенсорів. Певною мірою покращати параметри цифрових термометрів (ЦТ) можна із використанням структурних методів підвищення точності з автоматичним коригуванням похибок всього вимірювального тракту. Таке коригування ґрунтується на застосуванні калібраторів температури, які можуть конструктивно виконуватись

або вбудовуваними в захисну арматуру ТО, або знімними, що встановлюється лише на час калібрування [4–11].

2. Мета роботи. Знімні калібратори температури (КТ), порівняно із вбудованими не погіршують динамічних властивостей ТО. Однак, для їхнього коректного використання доцільно знати геометричні розміри чутливого елемента ТО, щоб зменшити методичні похибки, пов'язані із глибиною занурення ТО. Тому метою роботи є порівняння та вибір методу визначення геометричних розмірів чутливого елемента терморетворювачів опору в арматурі.

3. Обґрунтування вибору методу дослідження.

Рівняння теплового балансу ТО за незмінного агрегатного стану вимірюваного середовища і сталої температури тіл визначається як [12]

$$\Theta_{el} + I^2 R - G'_{TO}(\Theta - \Theta_{ds}) - G_{TO}(\Theta - \Theta_x) - \zeta_{PP} S(\Theta - \Theta_x) - G_{II} S \left[\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_{CT}}{100} \right)^4 \right] - mc \frac{d\Theta}{dt} = 0$$

де $\Theta_{el} = I^2 R$ – теплота Джоуля–Ленца, що виділяється в ТО; $G'_{TO} = G'(\Theta - \Theta_{ds})$ – втрати тепла ТО через арматуру в довкілля; $G_{TO} = G_{TO}(\Theta - \Theta_x)$ – кількість тепла, отримана від вимірюваного середовища; $\Theta_{ds} = \zeta S(\Theta - \Theta_x)$ – кількість тепла, одержана ТО через конвекцію; $\Theta_{ВІР} = C_{II} S \left[\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_{CT}}{100} \right)^4 \right]$ – кількість тепла, отримана ТО через випромінювання; G' – теплова провідність ТО–довкілля; $\Theta - \Theta_{ds}$ – різниця температур чутливого елемента Θ ТО та довкілля Θ_{ds} ; G_{TO} – теплопровідність ТО–вимірюване середовище; Θ_x – температура вимірюваного середовища; ζ – коефіцієнт конвекції; S – площа поверхні ТО; C_{II} – коефіцієнт випромінювання ТО; Θ_{CT} – температура стінки об'єму вимірюваного середовища.

На підставі поданого рівняння можна запропонувати методику визначення геометричних розмірів чутливого елемента ТО його зануренням із повітря з температурою Θ_{ds} у рідину з вищою температурою Θ_x . Завдяки приблизно на три порядки більшому значенню коефіцієнта теплопровідності ТО у воді порівняно із повітрям, можна буде за помітними змінами опору зробити висновок про геометричні розміри чутливого елемента ТО та розташування його в арматурі. Однак на практиці ця методика є достатньо енергоємною, оскільки для отримання задовільних результатів потрібно використовувати підігрівні термостати з доволі значною (десятки Кельвінів) різницею температур Θ_x довкілля та вимірюваною Θ_{sp} середовища. Значно

простішою є методика, що ґрунтується на розігріванні ТО вимірювальним струмом. Для зменшення похибок визначення геометричних розмірів за рахунок зміни умов природної конвекції та випромінення у повітря, ТО доцільно помістити у пасивний термостат. Вимірюване середовище (воду) для збільшення коефіцієнта тепловіддачі необхідно перемішувати.

Перехідні процеси охолодження ТО також описуються рівнянням теплового балансу. На стадії регулярного теплового режиму в рівнянні (1) з'являється складова, що враховує додаткове тепло, яке втрачається на зменшення теплоємності [12]

$$I^2 R - G'_{TO}(\Theta - \Theta_{ds}) - G_{TO}(\Theta - \Theta_x) - \zeta_{PP} S(\Theta - \Theta_x) - G_{II} S \left[\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_{CT}}{100} \right)^4 \right] - mc \frac{d\Theta}{dt} = 0 \quad (2)$$

де $\zeta_{PP} = \frac{c_k \lambda}{d} Re^r Pr^{0.4}$ – коефіцієнт тепловіддачі для рідини; m – маса ТО; c – теплоємність ТО; λ – коефіцієнт теплопровідності; d – діаметр ТО; c_k, r – функції швидкості рідини; $Re = \frac{vd}{\nu}$ – критерій Рейнольдса; ν – швидкість руху води; ν – кінетична в'язкість, що визначається відношенням абсолютної в'язкості до густини речовини; $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ – критерій Прандтля; α – температуропровідність.

Якщо знехтувати втратами на випромінення, то ТО є аперіодичною ланкою із сталою часу $T = \frac{mc}{\zeta_{\Sigma}}$,

де $\zeta_{\Sigma} = (G'_{TO} + G_{TO} + \zeta_{PP} S)$ – сумарний коефіцієнт теплопередачі, що визначається теплопровідністю та конвекцією. За умови, що коефіцієнт $\zeta_{\Sigma} \rightarrow \infty$, стала часу ТО прямує до граничного значення і перехідний процес стає дорегулярним $T = \frac{1}{ka}$, де k – коефіцієнт, зумовлений геометричними розмірами ТО [12].

В операторній формі перехідний процес ТО (його температура) визначають як

$$\Theta_{(p)} = \frac{I^2 R + G'_{TO} \Theta_{ds} + G_{TO} \Theta_x + \zeta_{PP} S \Theta_x}{\left(G'_{TO} + G_{TO} + \zeta_{PP} S \right) \left(1 + \frac{mc}{G'_{TO} + G_{TO} + \zeta_{PP} S} P \right)} \quad (3)$$

4. Порівняння методів дослідження. Необхідна глибина занурення термометра залежить від його конструкції, різниці температур між вимірюваним і навколишнім середовищами, коефіцієнтом передавання тепла вимірюваного середовища і температурною стабільністю вимірюваного середовища.

Суть одного із методів визначення необхідної глибини занурення термометра в середовище, полягає в тому, що термоперетворювач повільно або маленькими кроками занурюється в середовище і спостерігають, як буде змінюватись вимірювана величина (рис. 1). Коли вимірювана величина перестане змінюватись, за умови, що температура вимірюваного середовища є сталою, то це і визначатиме мінімальну необхідну глибину занурення. Ідеальний перебіг температури можливий за таких умов: температура повітря є сталою (незмінною), відсутні градієнти температури у воді і повітрі, площа поверхні сенсора дорівнює нулеві (точковий сенсор), відсутнє передавання тепла всередині термометра.

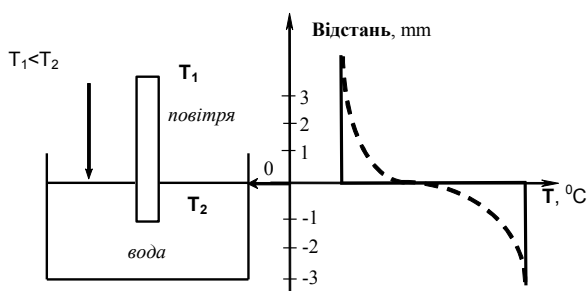


Рис. 1. Перебіг температури залежно від глибини занурення: чорна лінія – ідеальний перебіг; пунктирна лінія – реальний перебіг температури

Штриховою лінією поданий реальний перебіг встановлення температури, який відрізняється від ідеального – у повітрі є температурний градієнт, який пов'язаний із обміном тепла між водою. На позиціях '0' (перехід повітря–вода), та "–1" і "–2" термометр не показує температуру води, натомість температуру, яка є вищою від температури повітря, але нижчою від температури води. Це пов'язано із тим, що сенсор не повністю занурений у воду, наявний температурний градієнт як в самому термометрі, так і у воді. Починаючи від позиції '–3' і далі температура термоперетворювача досягає температури води, достатня глибина занурення термометра досягнута. Саме через це температура, яку показує термометр, є сталою.

Метрологічні дослідження повинні вестись за значень струмів, не більших від 1 mA. Температура

вимірюваного середовища (тут води) повинна відрізнятись від температури повітря (бути вищою або нижчою). Термоперетворювач потрібно занурювати дуже повільно, найкраще міліметр за міліметром і відстань (глибина), на якій показ термоперетворювача більше не буде змінюватись, інакше кажучи, різниця між температурами на позиції n і на позиції $n-1$, буде дорівнювати нулеві, і буде необхідною глибиною занурення для цього середовища.

Цей метод нескладний у реалізації. Необхідні прилади: джерело струму, вольтметр, термостат (для того, щоб забезпечити сталу температуру середовища, наприклад, води) і пристрій, за допомогою якого можливо міліметр за міліметром занурювати термометр у вимірювальне середовище. Однак недоліком цього методу є негладкість поверхні води, що унеможливило точне виставлення нульового рівня.

Щоб виміряти вихідний сигнал термометра опору, через сенсор повинен протікати струм. Цей вимірювальний струм розігріває сенсор і термометр показує завищені покази. Саморозігрівання термоперетворювача залежить від умов застосування (наприклад, швидкості протікання, теплоємності, термічної провідності вимірюваного середовища) і конструкції (наприклад геометричних розмірів складових частин, теплопровідності матеріалів, з яких виготовлений термометр) термоперетворювача. Для аналізу явища саморозігрівання доцільно використовувати співвідношення:

$$E = \frac{T_T - T_C}{R \cdot I^2}, \quad (4)$$

де E – коефіцієнт саморозігрівання; T_T – температура сенсора (показ термометра); T_C – температура вимірюваного середовища; R – опір сенсора; I – вимірювальний струм.

Це явище саморозігрівання буде використане у другому методі. Для досліджень будуть використані ті самі прилади, що і в методі 1. Проте умови, за яких будуть вестись дослідження, відрізняються.

Термометр буде покроково занурюватись у середовище, на кожній позиції буде вимірюватись температура за різних струмів, що протікають через термометр, наприклад, від 1 mA до 10 mA. Глибина занурення, на якій температура термометра більше не змінюється, інакше кажучи, різниця між температурами на позиції n і на позиції $n-1$ буде дорівнювати нулеві, і буде необхідною глибиною занурення.

На рис. 2 показано перебіг встановлення температури термометра. Коли вимірюється температура (за до-

помогою термометра опору) струмами, більшими від 1 mA, то це призводить до появи додаткового розсіювання потужності на сенсорі, що, своєю чергою, призводить до хибного показу термометра. Це означає, що термометр завжди показує більше значення, ніж реальна температура середовища. Чим більший струм, тим вища потужність, тим більшою є похибка вимірювання.

Повітря і вода можуть відводити різну кількість тепла, виникає різниця під час вимірювання температури однаковим струмом в повітрі і у воді (вода може відводити більшу кількість тепла, ніж повітря).

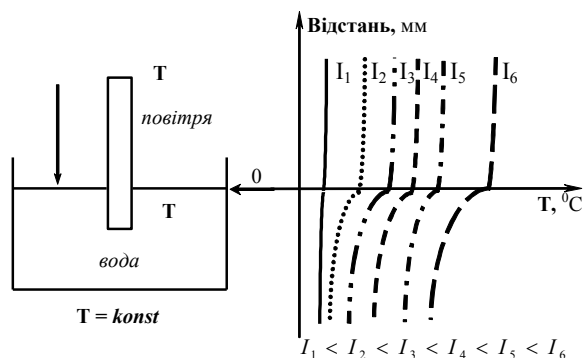


Рис. 2. Перебіг температури за методом перегрівання чутливого елемента ТО

В області, меншій за '0' (перехід повітря–вода), коли сенсор ще не повністю занурений у воду, на нього діють два різні середовища – повітря і вода. У такому разі при кожній зміні позиції змінюються умови теплопередачі і температура, яка встановилась на сенсорі під дією двох середовищ. З моменту, коли на сенсор діє тільки одне середовище, термометр показує сталу температуру, вже незалежно від подальшого занурення термоперетворювача. Під час дослідження температури повітря і води повинні бути однаковими.

5. Описання експериментальної устави. Для лабораторних досліджень були вибрані такі умови: вимірюване середовище – спокійна вода; температури повітря і води однакові; потужності: 0...9 mW з кроком по 2,25 mW.

З цих потужностей були знайдені значення вимірювальних струмів:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}, \quad (5)$$

R – опір термометра при 21 °C (108,18 Ом); P – вибрані потужності; I – вимірювальний струм.

Додатково був взятий струм 0,05 mA, щоб мати можливість виконувати вимірювання температури майже без саморозігрівання. Цим методом усувається недолік першого: встановлення '0'-рівня.

Опрацювання даних здійснювалось на комп'ютері за допомогою програмного пакета *Matlab*. Для цього потрібно побудувати вимірювальну схему (рис. 3), у якій всі прилади під'єднані до комп'ютера.

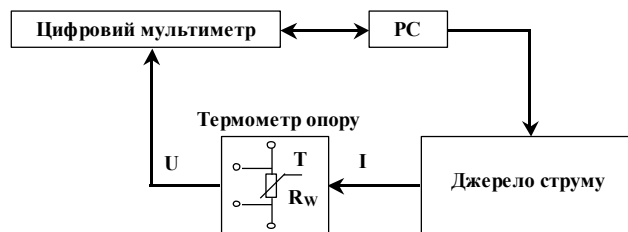


Рис. 3. Вимірювальна схема для всіх досліджень

Інформація про динамічні характеристики контактних термометрів необхідна у таких випадках:

- визначення необхідного часу вимірювання в середовищі, для забезпечення заданої похибки вимірювання;
- порівняння динамічних властивостей різноманітних термометрів для вибору найпридатнішого до вимірювання за певних умов;
- описання динаміки сенсора як частини кола керування температурою.

Були використані ТО двох різних фірм: три термометри опору фірми Conatex Mess- und Regelungstechnik GmbH, St. Wendel (надалі позначені як *Conatex 36, 37 і 38*), чотири термометри опору фірми H. Heinz Messwiderstände GmbH, Elgersburg (надалі позначені як *Heinz 1, 3, 4 і 5*). Зовнішній діаметр всіх термометрів становить 1 мм і довжина термометрів *Conatex 520* мм, *Heinz 535* мм. Всі термометри мають чотирипровідну схему підключення аж до самого сенсора, окрім термометра *Heinz 1* (він має двопровідну схему).

Для досліджень необхідно визначити час вимірювання термометром, тобто час, за який на термометрі встановиться температура вимірюваного середовища. Під час визначення часу вимірювання термометром було вибрано певну послідовність потужностей, яка подавалась на термометр опору, цифровим мультиметром вимірювали часовий перебіг параметрів переходного процесу встановлення температури і за допомогою комп'ютера визначали сталу часу τ . Стала часу τ була визначена тільки для повітря, оскільки відомо, що значення τ у воді є набагато меншим, ніж у повітрі.

6. Аналіз результатів експериментів. Результати експериментальних досліджень для одного ТО підтвердили теоретичні припущення (рисунок 4, 5).

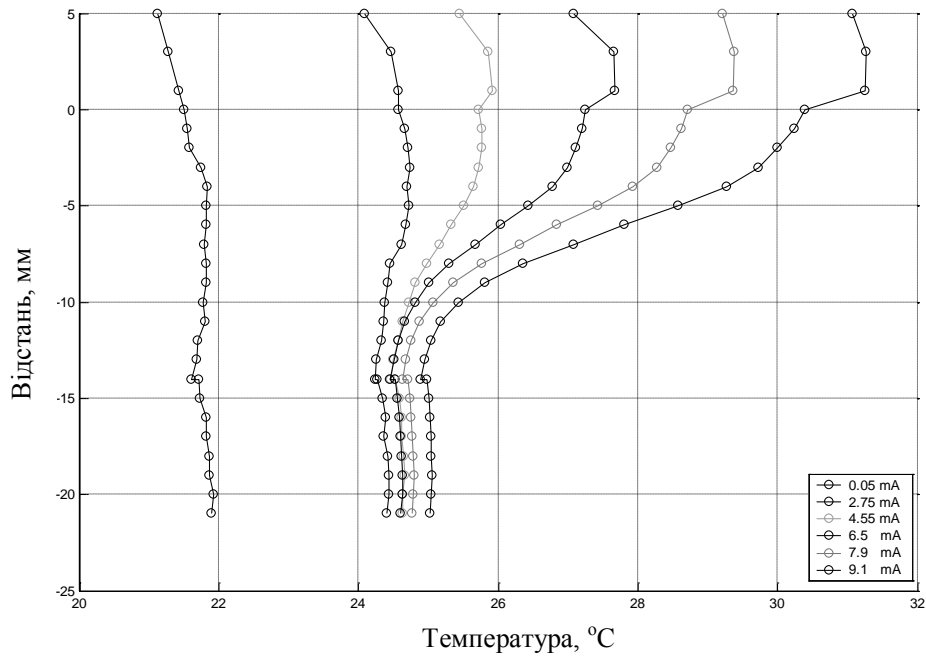


Рис. 4. Температура Heinz 3-термометра залежно від глибини занурення ТО

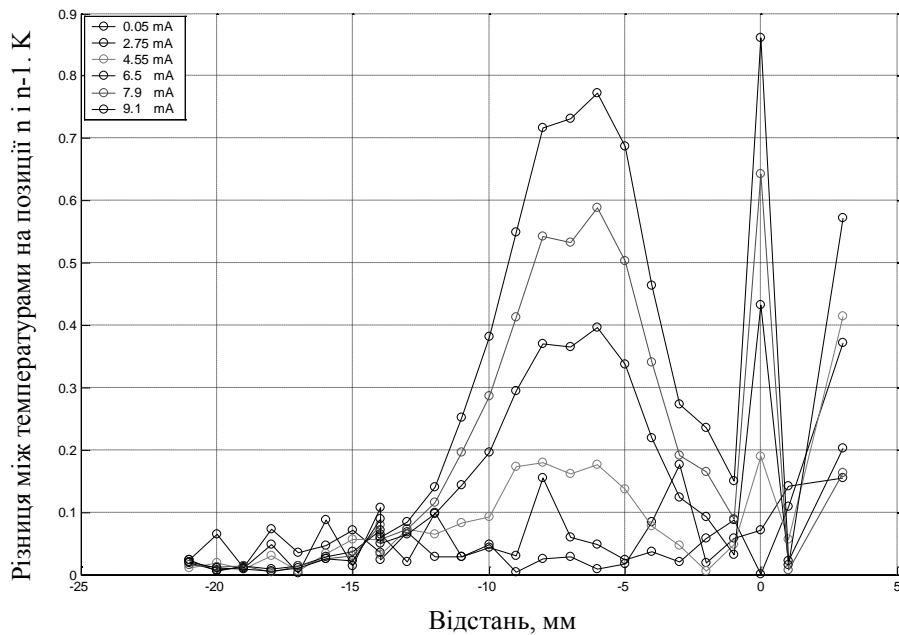


Рис. 5. Залежність різниці коефіцієнтів саморозігрівання на сусідніх позиціях від глибини занурення ТО

З аналізу рисунків можна зробити висновок про можливість визначення геометричних розмірів ТО за допомогою термічних методів.

7. Висновки. Було розроблено метод, який дає змогу термічними дослідженнями визначити геометричні параметри мініатюрних термоперетворювачів

опору і, дає змогу порівнювати між собою термометри за такими параметрами: довжиною чутливого елемента, його розташуванням щодо каркасу, сталу часу ТО.

Суть методу полягає в покроковому зануренні ТО у середовище (воду) і зніманні показів, а перегрівання чутливого елемента здійснюється вимірювальним струмом.

На графіках може бути декілька точок перегину. Відстань, на якій знаходиться “друга точка перегину” показує початок чутливого елемента. Коли графік температурного перебігу термоперетворювача не має “другої точки перегину”, можливо, що відстань від чутливого елемента до початку захисної трубки є меншою, ніж 1 мм (дискретність встановлення глибини занурення).

Коли різниця між температурами на сусідніх позиціях є меншою від 1 К, то це означає, що термічним способом знайдено закінчення чутливого елемента.

Виконаний аналіз показав, що термічним способом можливо встановити геометричні розміри чутливого елемента з похибкою не більшою, ніж $\pm 1\%$, що є достатнім для встановлення розмірів мініатюрних калібраторів температури на основі реперних матеріалів.

1. Датчики для измерения температуры в промышленности. Самсонов Г.В., Киц А.И., Кюздени О.А., и др. – К., 1972. 2. Приборы для измерения температуры контактным способом. Под ред. Бычковского. – Львов, 1978. 3. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры. – К., 1983. 4. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М., 1986. 5. Бернгард Ф., Богун Д.,

Августин С., Маммен Х., Донин А. Применение самокалибрирующихся термометров с реперными материалами при температурах 500–650°C в парогенераторах. // Вимірювальна техніка та метрологія. – №63. – 2003. – С.55–59. 6. Стадник Б., Дорожовець М., Бернгард Ф., Кулик О. Корекція похибок вимірювання термометра із вбудованим реперним калібратором і вторинним температурним сенсором. // Вимірювальна техніка та метрологія. – №63. – 2003. – С.70–74. 7. Прохоренко С., Стадник Б., Ватурський Я. Попередні результати апробації температурного репера на базі In-Ga-Sn евтектики. – // Вимірювальна техніка та метрологія. – №63. – 2003. – С.28–30. 8. Иванова Е.П., Иванов Ю.А., Йогельсон Г.Л., Косенко О.А., Назаренко Л.А. Багатоканальний калібратор ТС-400 для градування контактних датчиків температури. Тези доповіді 8-ої міжнародної конф. “Температура-2003”. – Львів: Ліга-прес.–2003.– С.69. 9. Устройство для поверки термоэлектрических преобразователей. – А.С.1415082(СССР). А.А. Саченко, В.Ю. Мильченко, И.П. Куритный, В.В. Кочан.–Опубл.Б.И., 1988, №29. 10. Ronsin H., Elgonrdon, M. Extension of the minicell thermocouple calibration technique to the palladium fixed point/ Tempako-96.–Levrotto–Bella, Torino/–1996/ – p.189–194. 11. Lehman H., Bernhard F. Self-calibration thermocouples/ Tempako-96.–Levrotto–Bella, Torino. – 1996.–p.195–206. 12. Электрические измерения незлектрических величин. Под ред. П.В. Новицкого.– Л., 1975.

УДК 621.317

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЦИЛІНДРИЧНОГО ЄМНІСНОГО ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ ВНУТРІШНІМ ЕЛЕКТРОДОМ СКЛАДНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

© Івах Роман, 2006

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

Розглянуто основні вимоги до ємнісних первинних перетворювачів. Запропонована методика розрахунку ємності та провідності циліндричного ємнісного первинного перетворювача із внутрішнім електродом складної конструкції.

Рассмотрены основные требования к емкостным первичным преобразователям. Предложена методика расчета емкости и проводимости цилиндрического емкостного первичного преобразователя с внутренним электродом сложной конструкции.

The main requirements to capacitive primary converters are reviewed. The technique of calculation of capacitance and conductivity of the cylindrical capacitive primary converter with an internal welding rod of a composite design is offered.

Вступ. Ємнісним називають перетворювач у вигляді конденсатора, ємність якого залежить від вимірюваної неелектричної величини. Ємність кон-

денсатора визначається його конструктивними параметрами та діелектричною проникністю середовища між обкладинками конденсатора. Найпошире-