

МЕТРОЛОГІЯ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ

УДК 621.316.1; 644.61/62

МОЖЛИВОСТІ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ПЕРЕВІРКИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ТЕПЛА НА МІСЦІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Василь Яцук, Поліна Бугайцова, 2009

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розглянуто концепцію побудови метрологічного забезпечення комерційних індивідуальних лічильників тепла на місці експлуатації без демонтажу.

Рассмотрена концепция построения метрологического обеспечения коммерческих индивидуальных счетчиков тепла на месте эксплуатации без демонтажа.

Concept of the metrological supply formation of commercial individual head counters at the exploitation place without mounting is considered.

Вступ. Однією із складових комплексного підходу до раціонального використання тепла в системах централізованого теплопостачання є організація обліку споживання тепла за допомогою теплолічильників. Це дає змогу розробити техніко-організаційні заходи, спрямовані на зменшення втрат та запобігання нерациональному використанню тепла, встановлювати об'єктивні норми обліку споживання тепла [1]. Досвід зарубіжних країн показує, що комплексний підхід до енергозаощадження дає змогу економити до 25 % споживаних енергоносіїв [2].

Враховуючи те, що ціни на імпортований природний газ постійно зростають, актуальним є вирішення завдання зменшення його використання житлово-комунальними господарствами (ЖКГ) для обігріву помешкань.

В Україні житловий фонд використовує принцип колективного теплопостачання, понад половини матеріально-технічної бази як ЖКГ, так і житлового фонду є фізично зношеною і морально застарілою [3].

В цих умовах важливою проблемою теплопостачання є об'єктивний облік кількості спожитої теплової енергії із урахуванням якості наданих послуг.

Постановка задачі досліджень. Одним з шляхів забезпечення якості приладів обліку тепла є розроблення нормативних документів, в яких регламентуються основні вимоги до систем індивідуального обліку тепла. Цим завданням відповідає стандарт ДСТУ EN 1434 “Теплолічильники”, гармонізований з

європейськими нормами [4]. Стандарт регламентує формули для розрахунку кількості тепла та дійсного значення теплового коефіцієнта, що є функцією властивостей теплоносія, що вкрай необхідно для розробників теплолічильників. Теплолічильники поділяються на три класи точності залежно від нормованих границь допустимої похибки, причому її значення не перевищує декількох відсотків. Такі порівняно великі значення похибок колективних лічильників дають змогу визначити індивідуально спожиту кількість тепла з похибками, значення яких може сягати навіть декількох десятків відсотків.

Окремою, дуже важливою проблемою побудови систем обліку тепла є розроблення та впровадження засобів індивідуального обліку теплової енергії без врізування в навану тепломережу, що слугуватиме об'єктивним чинником її всебічної економії. Останнім часом була запропонована система та методика визначення індивідуально спожитого тепла, яка ґрунтується на визначенні різниць температур між входами нагрівальних пристроїв сусідніх приміщень, розташованих як в горизонтальних, так і у вертикальних площинах будівлі [5]. Ця структура будинкової системи для визначення розподілу спожитої енергії на опалення індивідуальних споживачів не вимагає врізування в наявну теплову мережу. Але її впровадження в практику стримується невирішеністю проблеми метрологічного забезпечення на місці експлуатації складної багатоканальної вимірювальної системи обліку спо-

житої теплової енергії. Окрім того, відсутні нормативні документи, які б регламентували питання обліку спожитого тепла індивідуальними споживачами – приватними особами, підприємствами тощо.

Оскільки споживану окремим споживачем кількість теплової енергії в багатоквартирній будівлі практично неможливо теплоізулювати через теплопередавання огорожувальними будівельними конструкціями, то пропонується використати інтегральний принцип побудови, що ґрунтується на вимірюванні різниці температур між поверхами вздовж теплорозподільних стояків.

Метрологічні особливості побудови систем індивідуального обліку тепла. Узагальненим параметром, пропорційним до спожитого тепла в кожному опалюваному приміщенні, в такій системі буде його температура, причому значення виміряного індивідуального спожитого тепла в ньому через уточнювальний коефіцієнт приводиться до виміряної колективним лічильником кількості тепла. Така система обліку може забезпечити високу точність і стати комерційною. Завдяки малим масогабаритним показникам та невеликій вартості, що дасть змогу у результаті й істотно зменшити собівартість системи обліку теплової енергії, перевагу у використанні як температурних сенсорів треба віддати кремнієвим термоперетворювачам на основі р–п-переходу, діапазон вимірювання є задовільним ($-60 \dots +150$) $^{\circ}\text{C}$ і похибка не перевищує декількох десятків Кельвіна.

Також теоретично показано ефективність методу цифрового опрацювання миттєвих значень різниць температур між поверхами з отриманням проміжних результатів вимірювань теплової енергії у вигляді кодів з подальшим їх опрацюванням мікро-ЕОМ [5]. Для усунення розкиду параметрів таких сенсорів від зразка до зразка запропонований метод уніфікації їх характеристик з модуляцією вимірювального струму. Теоретичні та лабораторні дослідження показали, що в цьому режимі температурна залежність сенсорів з р–п-переходом є лінійною у порівняно широкому діапазоні перетворюваних температур від 100 до приблизно 500 К з похибкою, не більшою за $\pm 0,1$ К [6]. Забезпечуються також інваріантність до впливу опорів бази та емітера вимірювального діода, а також опорів двопровідної з'єднувальної лінії зв'язку. Запропоновано також пристрій для вимірювання температури, який легко може бути реалізований в інтегральному виконанні, у вигляді окремої мікросхеми, або як

вимірювальний канал температури у багатофункціональних пристроях [7].

Особливості реалізації метрологічної перевірки індивідуальних теплотічильників на місці експлуатації. Очевидно, що розглянуті вище складні технічні системи індивідуального обліку тепла в будівлях з багатовводним підведенням тепла повинні проходити метрологічну перевірку на місці експлуатації. Не підлягає сумніву також необхідність використання в будівлі колективного теплотічильника. Для метрологічної перевірки систем індивідуального обліку тепла без врізування в тепломережу може бути використаний метод калібрування або прецизійного вимірювання температури у кожній з вимірюваних точок. Очевидно, що необхідним елементом засобів метрологічного забезпечення в обох випадках є прецизійний термометр. На підставі параметрів колективних теплотічильників мінімальне значення різниці температур ± 3 $^{\circ}\text{C}$, дискретність показів 0,1 $^{\circ}\text{C}$; межа допустимих значень похибки вимірювання різниці температур не більша за $\pm 0,1$ $^{\circ}\text{C}$, необхідно встановити в декількох разів менші значення похибок $\pm (0,02 \dots 0,03)$ $^{\circ}\text{C}$ та дискретності показів 0,01 $^{\circ}\text{C}$ прецизійного термометра. Найбільшим недоліком транзисторних сенсорів температури, як і переважної більшості напівпровідникових сенсорів узагалі, є великий технологічний розкид параметрів, який для однотипних р-п-переходів може досягати $\pm (1 \dots 10)$ % [8, 9]. У температурному еквіваленті при 0 $^{\circ}\text{C}$ це становитиме $\pm (3 \dots 33)$ $^{\circ}\text{C}$. Очевидно, що метод розбракування дискретних транзисторних сенсорів у групи з невеликим нормованим розкидом трудомісткий та дорогий. Однак проблема розбракування груп сенсорів може бути успішно вирішена для транзисторів, виготовлених з однієї напівпровідникової пластини в єдиному технологічному циклі. Так, середньоквадратичні відхилення основних геометричних параметрів р-п-переходів під час виготовлення – глибини дифузії домішок та товщини епітаксialного шару – вздовж поверхні напівпровідникової пластини не перевищує 0,5 % [10, 11]. Це дає можливість підбору груп сенсорів з допусками в декілька десятків Кельвіна, що робить їх конкурентоспроможними із стандартними металевими перетворювачами температури. Потрібно зазначити, що трудомістка процедура підбору приведе до втрати однієї із найважливіших переваг сенсорів – малої вартості. Під час модуляції вимірювального

струму сенсорів нескориговане значення похибки визначатиметься відмінностями в об'ємних конфігураціях р-п-переходів і, як показує результат експерименту, становитиме одиниці Кельвіна в околі кімнатних температур [7]. Отже, проблема взаємозамінності сенсорів, побудованих на основі серійних р-п-переходів, сьогодні остаточно не вирішена і тому доцільно дослідити можливості схемотехнічних прийомів уніфікації сенсорів температури.

Для спрощення аналізу подамо рівняння сенсора з р-п-переходом у такому вигляді [12]

$$U_{np} = \left(r_0 I_{np} + \varphi_0 \ln \frac{I_{np}}{I_{S0}} \right) + r_0 I_{np} C_T \theta - \varphi_T (1 - GT) (m_{0T} + m_T \theta) \frac{\theta}{T_0} - 3\varphi_T \ln \left(1 + \frac{\theta}{T_0} \right) + \frac{k\theta}{q} \ln \frac{I_{np}}{I_{S0}}, \quad (1)$$

де U_{np} – напруга на прямозміщеному р-п-переході; I_S – тепловий струм; I_{np} – вимірювальний струм сенсора; r_0 – опір бази; $\varphi_T = kT_x/q$ – температурний потенціал; k – стала Больцмана; T_x – температура р-п-переходу; q – заряд електрона; $T_0 = 273,15$ К; $\varphi_0 = kT_0/q$; C_T – температурний коефіцієнт опору бази сенсора; m_{0T} , m_T – коефіцієнт інжекції та його температурна зміна відповідно; G – температурний коефіцієнт напруги ширини забороненої зони напівпровідника; $\theta = T_x - T_0$.

Як видно з рівняння (1), математична модель температурного сенсора на основі р-п-переходу містить адитивну, мультиплікативну та нелінійну складові. Доцільно визначити можливий технологічний розкид сенсорів Δ_{TX} через параметри його математичної моделі

$$\Delta_{TX} = U_{np} - U_{npn} = -I_{np} r_{0n} [\delta_0 (1 + C_{rn} \theta) + \delta_c C_{rn} \theta] + \varphi_T (\Delta_{0T} + \Delta_{mT} \theta) (1 - GT) \frac{\theta}{T_0} + \varphi_T \delta_{S0}, \quad (2)$$

де r_{0n} , C_{rn} – номінальні значення опору бази та його температурного коефіцієнта; δ_0 , δ_c – відносний технологічний розкид опору бази та його температурного коефіцієнта; $\Delta_{0T} = m_{0T} \delta_{0T}$, $\Delta_{mT} = m_{0T} \delta_{mT}$ – абсолютний технологічний розкид коефіцієнтів m_{0T} та m_T ; δ_{0T} , δ_{mT} – відносний технологічний розкид коефіцієнтів m_{0T} та m_T ; δ_{S0} – відносний технологічний розкид значень теплового струму.

При виготовленні транзисторних діодів як спеціалізованих мікросхем температурних сенсорів певні

перспективи відкриваються у схемотехнічних прийомах. Насамперед це стосується усереднення технологічних розкидів при використанні однотипних елементів. Найпростіше це реалізується при паралельному або послідовному з'єднанні транзисторних діодів.

При паралельному з'єднанні транзисторних діодів (рис. 1) напруга на кожному з них є величиною заданою, а струми, які протікають через кожен і-ту ланку, залежать від її провідності, а отже, і від технологічного розкиду.

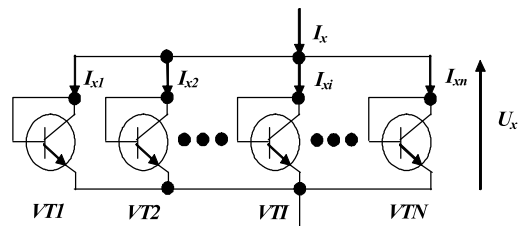


Рис. 1. НПТ на основі паралельно сполучених транзисторів

Із урахуванням технологічних розкидів значення напруги U_{np} записується як

$$U_{np} = U_{np11} (1 - \delta_{U_{np}}) = U_{np11} - I_{in} r_{0n} [\delta_{\theta i} (1 + C_{rn} \theta) + \delta_{\theta i} C_{rn} \theta] - I_{in} r_{0n} \delta_{I_i} (1 + C_{rn} \theta) + \varphi_{зк} (\Delta_{0T_i} + \Delta_{mT_i} \theta) (1 - GT) - \varphi_T \delta_{I_i} + \varphi_T \delta_{S0i} \quad (3)$$

де U_{xn} – номінальне значення напруги на сенсорів; δ_{ix} – відносний сумарний розкид напруги паралельно сполучених сенсорів; I_{in} , δ_{I_i} – номінальне значення струму та його відносний розкид в і-й ланці; $\delta_{\theta i}$, $\delta_{c i}$ – відносні розкиди опору бази r_0 та його температурного коефіцієнта в і-й ланці; Δ_{0T_i} , Δ_{mT_i} – абсолютні розкиди коефіцієнтів m_{0T_i} та m_{T_i} в і-й ланці; δ_{S0i} – відносний розкид теплового струму в і-й ланці.

Після перетворень з рівності (3) визначимо відносний розкид струму δ_{I_i} в і-й ланці

$$\delta_{I_i} = \frac{\delta_{U_{np}} U_{np}}{I_{in} r_{0n} (1 + C_{rn} \theta) + \varphi_T} - \frac{I_{in} r_{0n} [\delta_{\theta i} (1 + C_{rn} \theta) + \delta_{c i} C_{rn} \theta]}{I_{in} r_{0n} (1 + C_{rn} \theta) + \varphi_T} + \frac{\varphi_{зк} (\Delta_{0T_i} + \Delta_{mT_i} \theta) (1 - GT) \frac{\theta}{T_0} + \varphi_T \delta_{S0i}}{I_{in} r_{0n} (1 + C_{rn} \theta) + \varphi_T} \quad (4)$$

Напругу U_{xnp} на паралельному з'єднанні транзисторних діодів визначимо за законом Ома

$$U_{xnp} = \frac{I_{np}}{G} \text{ або } U_{npn} (1 - \delta_{U_{np}}) = I_{np} / \sum_{i=1}^m G_i, \quad (5)$$

де G – сумарна провідність паралельного з'єднання; G_i – провідність i -ї ланки.

Сумарну провідність визначимо через провідність ланок

$$G = \sum_{i=1}^n G_i = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{U_{np}} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{in}(1 - \delta_{I_i})}{U_{npn}} : \quad (6)$$

$$: \sum_{i=1}^n \left\{ 1 - \frac{I_{in} r_{0n}}{U_{np}} [(\delta_{0i} + \delta_{I_i})(1 + C_{rn}\theta) + \delta_c C_{rn}\theta] + \frac{\Phi_{зк}}{U_{npn}} \left[\frac{(\Delta_{0Ti} + \Delta_{mTi}\theta)(1 - GT)}{T_0} \frac{\theta}{T_0} - \frac{-\Phi_T (\delta_{I_i} - \delta_{S0i})}{U_{npn}} \right] \right\}$$

Після перетворень рівності (6) і підстановки її в (5) отримаємо

$$U_{xnn} = U_{npn} \left\{ 1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\delta_{I_i} \left(1 - \frac{I_{in} r_{0n} (1 + C_{rn}\theta_x)}{U_{xn}} \right) - \frac{I_{in} r_{0n} (\delta_{0i} + (\delta_{0i} + \delta_{ci}) C_{rn}\theta_x)}{U_{xn}} + \frac{\Phi_T}{U_{xn}} \delta_{S0i} + \frac{\Phi_{зк}}{U_{xn}} (\Delta_{0Ti} + \Delta_{mTi}\theta_x) (1 - GT_x) \frac{\theta_x}{T_0} \right] \right\} \quad (7)$$

Підставивши вираз (5) в (7), після перетворень одержимо

$$\delta_{UX} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ I_{in} r_{0n} [\delta_{0i} (1 + C_{rn}\theta) + \delta_{ci} C_{rn}\theta] + \frac{\Phi_{зк}}{U_{npn}} (\Delta_{0Ti} + \Delta_{mTi}\theta) (1 - GT) \frac{\theta}{T_0} + \Phi_T \delta_{S0i} \right\} / U_{npn}, \quad (8)$$

З рівності (8) можна зробити такі висновки. Якщо технологічні розкиди параметрів транзисторних діодів мають нормальний закон розподілу, що справедливо для p - n -переходів, виготовлених в одному технологічному циклі, то середньоквадратичне відхилення напруги паралельно з'єднаних сенсорів зменшується в \sqrt{n} разів, де n – кількість сенсорів. Номінальне значення напруги сенсорів за умови, що через кожну з ланок протікає той самий струм, що й через одиночний транзистор, не змінюється. Вихідна напруга та чутливість такого сенсора такі самі, як і в одиночного транзистора.

Особливості послідовного сполучення транзисторів такі. Вихідна напруга такого сенсора зростає в n разів, так само, як і чутливість (n – кількість послідовно сполучених сенсорів). Для нормального закону розподілу розкидів параметрів середньоквадратичне відхилення напруги послідовно сполучених сенсорів зменшується у \sqrt{n} разів.

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 21 липня 2005 р. № 630 "Про затвердження Правил надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення та типового договору про надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення". 2. Бараннік В.О., Земляний М.Г. Энергозбереження – пріоритетний напрямок енергетичної політики та підвищення енергетичної безпеки України // Виступ на Міжнародній науково-практичній конференції "Енергоефективність – 2004". – м. Одеса 13–16 жовтня 2004 року. 3. Стан житлово-комунального господарства області на 1 травня 2004 року (Сумська обл.) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.stategov.sumy.ua/print.php?sid=1283>. 4. ДСТУ EN 1434 "Теплолічильники". 5. Столярчук П., Яцук В., Лозбін В., Голюка Б. Проблеми обліку теплової енергії індивідуальними споживачами // Стандартизація, сертифікація, якість. – № 1. – Харків. – 2006. – С.43–50. 6. Яцук В., Яцук Ю. Метод покращення характеристик напівпровідникових сенсорів на основі p - n -переходу // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. – № 59. – С. 90 – 96. 7. New Method of Dispersion Minimization of Si p - n Junction Temperature Sensors / V.O. Yatsuk, O.Ye. Basalkevych, Yu.V. Yatsuk, A.O. Sachenko // Proceedings of SAS 2007 – IEEE Sensors Applications Symposium, San Diego, California USA, 6-8 February 2007. – P. 1–4. 8. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с. 9. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 672 с. 10. Усилители с полевыми транзисторами / В.М. Немчинов, В.Г. Никитаев, М.А. Ожогин, В.В. Ляхович; Под ред. И.П. Степаненко. – М.: Сов. радио, 1980. – 192 с. 11. Остапенко Г.С. Аналоговые полупроводниковые интегральные микросхемы. – М.: Радио и связь, 1981. – 280 с. 12. Василюк В.М. Принципи побудови високоточних сенсорів на основі p - n -переходу // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1998. – № 53. – С. 70–76.