

УДК 621.317.7

Володимир Здеб, Петро Столярчук, Василь Яцук, Юрій Яцук
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

МЕТОДИ ПОБУДОВИ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ БУДИНКОВИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ СПОЖИТОЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

© Здеб Володимир, Столярчук Петро, Яцук Василь, Яцук Юрій, 2002

The theoretical design aspects of personal heat meters for multi introduction heat supplied system are analysed in this paper. The simplified ratio for personal heat meters construction is offered too. Also it makes choice of temperature semiconducting converters for using in personal thermal meters and creates it mathematical model for measuring current modulation mode.

У більшості житлових будинків використаний колективний принцип підводу теплової енергії, при якому до локального споживача, що займає декілька кімнат, тепла енергія підводиться від декількох окремих вводів. Сьогодні узаконений метод визначення кількості спожитої теплової енергії на опалення локальних споживачів, зокрема квартир багатоквартирних житлових будинків, згідно з яким вимірюють кількість спожитого тепла $Q_{кл}$ колективним лічильником на ввіді теплової мережі в будинок, визначають усереднене значення кількості тепла, що припадає на одиницю опалюваної площі, і розраховують кількість спожитої теплової енергії пропорційно до величини опалюваної площі приміщень споживача з урахуванням їхнього розміщення щодо захисних конструкцій будинків (біля торцевої стіни, над проїздом, на першому поверсі, на останньому поверсі тощо) [1]. Однак цей метод не дає змоги точно визначати кількість спожитої локальним споживачем теплової енергії і не служить об'єктивним економічним стимулом для всебічної економії ним теплової енергії, зокрема і встановленням регуляторів температури приміщень. Останнім часом запропонований новий метод визначення спожитої теплової енергії на опалення, який дає змогу за наявності колективного лічильника підвищити точність визначення спожитої теплової енергії як даним локальним споживачем, так і всіма споживачами в будівлі з багатопідводним принципом постачання теплової енергії в приміщеннях без необхідності реконструкції існуючих теплових мереж в будівлі, а також управління її споживанням, визначення місць її втрат та створення об'єктивного економічного важеля для всебічної економії споживаної теплової енергії [2]. Найпростіша реалізація такого способу полягає у вимірюванні ефективної температури поверхні кожного з нагрівачів $\theta_{іеф}$ і, при відомих значеннях їх ефективної площі нагрівання $S_{іеф}$ та опалюваної площі S_i i -го опалюваного приміщення, визначенні спожитої теплової енергії кожним окремим локальним споживачем $Q_{jлс}$ за співвідношенням

$$Q_{jлс} = \sum_{i=1}^n k_i S_i t_i q_{iS}, \quad (1)$$

де q_s – усереднене значення теплоти на одиницю опалюваної площі; S_i – площа опалюваного приміщення; t_i – проміжок часу, за який визначається спожита тепла енергія; k_i – коефіцієнт ефективності кожного з нагрівачів, який визначається за формулою

$$k_i = \frac{\lambda_i S_{ie\phi}}{q_{iS} S_i} \cdot (\theta_{ie\phi} - \theta_{i0np}), \quad (2)$$

де $S_{ie\phi}$ – ефективна площа нагрівання i -го нагрівача; λ_i – коефіцієнт тепловіддачі i -го нагрівача; θ_{i0np} – розрахункове значення температури в опалюваних приміщеннях; $\theta_{ie\phi}$ – ефективна температура поверхні i -го нагрівача; $i=0, 1, \dots, n$ – кількість опалюваних приміщень кожного із локальних споживачів.

Значення спожитої теплової енергії Q_{cm} всіма споживачами, які знаходяться в будівлі, визначається за співвідношенням

$$Q_{cm} = \sum_{j=1}^m Q_{jл}, \quad (3)$$

де Q_{cm} – спожита тепла енергія всіма споживачами, які знаходяться в будівлі; $j=0, 1, 2, \dots, m$ – кількість локальних споживачів в будівлі.

Порівнюючи значення підведеної до будинку $Q_{кл}$ та спожитої Q_{cm} всіма локальними споживачами теплової енергії, можна визначити кількість $\Delta Q_{втр}$ втраченої теплової енергії за формулою

$$\Delta Q_{втр} = Q_{кл} - Q_{cm} - Q_{нвт}, \quad (4)$$

де $Q_{нвт}$ – нормовані постійні втрати на опалення (сходові клітки, колективні сушарки для білизни, службові приміщення тощо); та встановити місця втрат теплової енергії $Q_{нвт}$.

Як видно із поданих вище співвідношень, в остаточному результаті задача обліку спожитої теплової енергії індивідуальними споживачами в будинку зводиться до побудови багатоканального вимірювача температури в кожному i -му опалюваному приміщенні. На перший погляд найпростіше розв'язати задачу багатоканального вимірювання температури можна за допомогою термоелектричних перетворювачів, однак їх мала чутливість та необхідність у засобах компенсації впливу зміни температури вільних кінців, суттєво ускладнює побудову такого вимірювача [3]. Напівпровідникові дискретні термоперетворювачі, незважаючи на високу чутливість, не можуть бути використані у багатоканальних вимірювачах температури через дуже великий технологічний розкид, а мікроелектронні – через те, що їх вихідним сигналом є температурозалежний струм, або ж вони вимагають спеціального трипровідного підключення [3]. Крім того, похибки обох видів сенсорів з р-п-переходами є неприпустимо великими (до ± 1 °C) для побудови теплотічників.

Для забезпечення взаємозамінності сенсорів з р-п-переходами в багатоканальній вимірювальній системі доцільно використати метод модуляції вимірювального струму [4], однак його значення слід вибирати набагато більшим від максимального значення зворотного струму р-п-переходу. Дійсно, якщо спад напруги на прямозміщеному р-п-переході в області кімнатних температур описується залежністю [6, 7]

$$U_i = I_i R + \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{I_i}{I_S}, \quad (5)$$

де k , T , q – відповідно, стала Больцмана, температура р-п-переходу та заряд електрона; I_i –

вимірювальний струм через р-п-перехід; $I_S = I_{S0} \cdot e^{\left(\frac{1}{\varphi_{T0}} - \frac{1}{\varphi_T}\right)}$ – тепловий струм р-п-переходу при температурі T ; I_{S0} – тепловий струм р-п-переходу при температурі $T=T_0$;

$\varphi_T = \frac{kT}{q}$; $\varphi_T = \frac{kT_0}{q}$; R – сумарний опір бази р-п-переходу, з'єднувальних проводів та комутаторів, включених в коло протікання струму I_i .

Для різних за значеннями вимірювальних струмів I_1, I_2, I_3 різниці відповідних спадків U_1, U_2, U_3 напруг $\Delta U_{12}=U_1-U_2, \Delta U_{31}=U_3-U_1, \Delta U_{123}=\Delta U_{12}-\Delta U_{31}$ на ньому дорівнюватимуть

$$\begin{aligned}\Delta U_{12} &= U_1 - U_2 = R(I_1 - I_2) + \varphi_T \ln \frac{I_1}{I_2}, \\ \Delta U_{31} &= U_3 - U_1 = R(I_3 - I_1) + \varphi_T \ln \frac{I_3}{I_1}, \\ \Delta U_{123} &= \Delta U_1 - \Delta U_2 = R[(I_1 - I_2) - (I_3 - I_1)] + \varphi_T \ln \frac{I_1^2}{I_2 I_3}.\end{aligned}\quad (6)$$

Для забезпечення інваріантності результату вимірювання до значення опору R слід прийняти $I_1 - I_2 = I_3 - I_1$. Якщо вибрати співвідношення між струмами $I_1 = aI_2$; $a \gg 1$, то різницю напруг знайдемо як

$$\Delta U_{123} = \varphi_T \ln \frac{I_1^2}{I_2 I_3} = \frac{kT}{q} \ln \frac{a^2}{2a - 1}.\quad (7)$$

Аналіз виразу (7) показує, що $a \neq 1$, він не має максимуму, для збільшення чутливості перетворення необхідно збільшувати співвідношення a між вимірювальними струмами I_1, I_2 і при $a \gg 1$

$$\Delta U_{123} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{a}{2}.$$

Через логарифмічну залежність суттєве збільшення співвідношення a не приводить до пропорційного збільшення чутливості перетворення $\varepsilon = \frac{\Delta U_{123}}{T} = \frac{k}{q} \cdot \ln \frac{a}{2}$ до вимірюваної температури T , наприклад, при $a_1=10$ і $a_2=100$ чутливість становить відповідно $\varepsilon_1=142$ мкВ/°С і $\varepsilon_2=335$ мкВ/°С і зростає тільки в 2,4 раза. Оскільки одиниця молодшого розряду при вимірюванні невеликих різниць температури (3...5) °С повинна становити декілька сотих Кельвіна, або (1...10) мкВ, то це значно ускладнює реалізацію систем обліку спожитої теплової енергії.

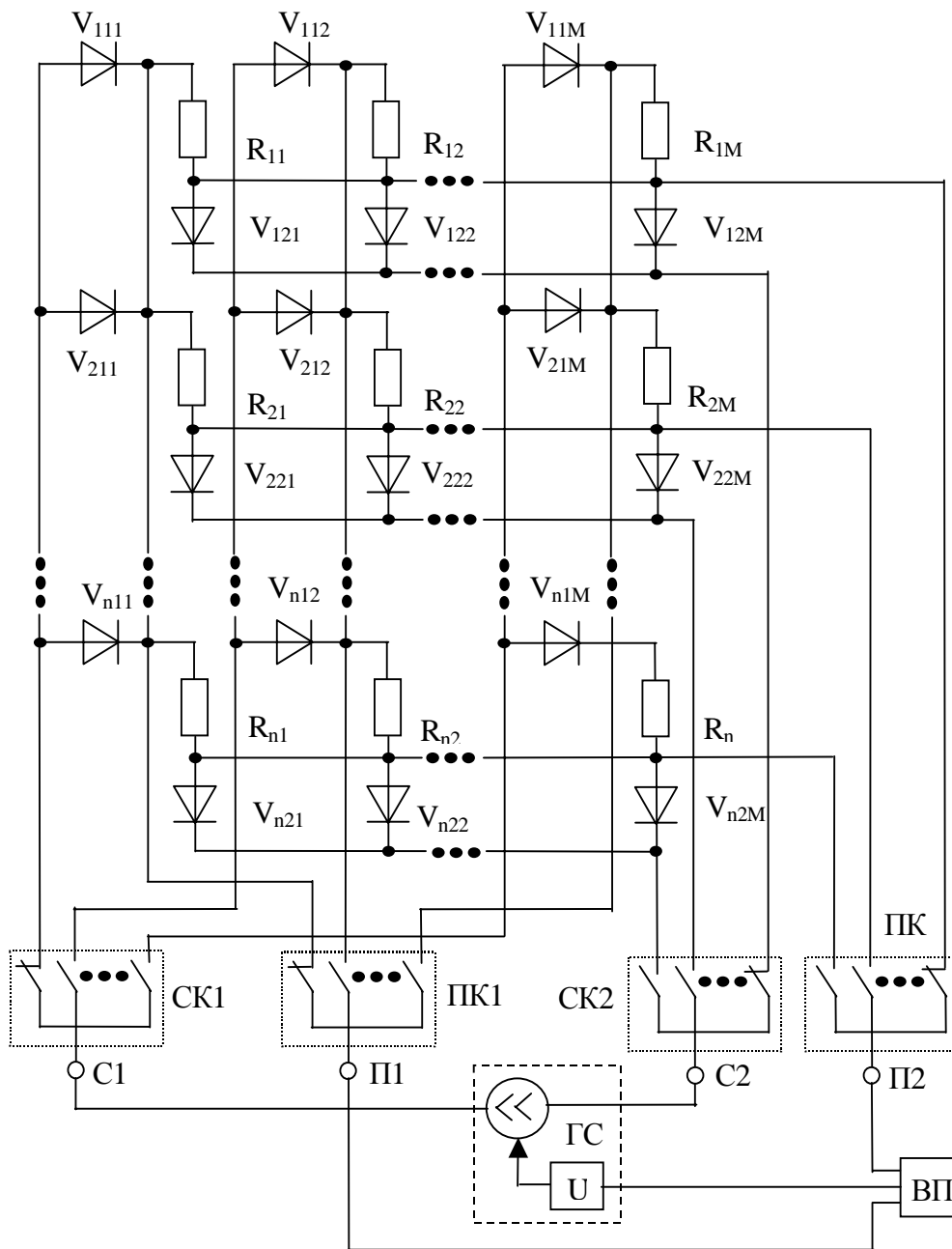
В декілька разів чутливість перетворення може бути збільшена при використанні терморезистивних перетворювачів (ТО). Наприклад, для мідного ТО з $R_0=50$ Ом, через який протікає імпульсний струм $I_\theta=10$ мА, чутливість за напругою становитиме вже 2 мВ/°С.

Основною проблемою побудови багатоканальної системи обліку спожитої теплової енергії є забезпечення інваріантності перетворення до опорів з'єднувальних проводів і комутатора, адитивної складової похибки, яка виникає у вимірювальних каналах, а також мінімізація кількості з'єднувальних проводів. Дійсно, для забезпечення інваріантності як напівпровідникові, так і терморезистивні перетворювачі повинні підключатись до вимірювального блока чотирипроводною лінією зв'язку. Для корекції адитивної складової похибки вимірювання температури слід проводити з модуляцією вимірювального струму.

Для прикладу розглянемо питання мінімізації кількості з'єднувальних проводів у системі обліку спожитої теплової енергії n -поверхового будинку, в якому тепло подається m стояками, за умови, що від одного стояка воно розгалужується на дві суміжні кімнати (для

прикладу, нехай $n=9$, $m=4$. Для послідовно сполучених термоперетворювачів у всій будівлі потрібно всього $p_{\sigma}=2(mn+1)$ з'єднувальних проводів ($p_c=74$), при цьому суттєво ускладнюється комутатор та схема вторинного приладу (ВП) через наявність синфазної вхідної напруги доволі великого значення (для середнього спаду напруги на одному термоперетворювачі близько $U_{TO} \approx 0,5$ В максимальне значення цієї напруги може становити $U_{max}=2mnU_{TO}=37$ В). За цих умов у комутаторі вхідної напруги необхідно використовувати релейні ключі, які мають значні та нестабільні контактні ЕРС, а схема ВП суттєво ускладниться, оскільки значення вхідної напруги перевищує максимально допустимі значення для стандартної мікроелектронної елементної бази. Для послідовно сполучених ТО в межах стояка потрібно $p_c=2(n+1)$ провід ($p_c=20$), $U_{\sigma max}=2(n+1)U_{TO}=10$ В, а в межах будинку потрібно $p_{\sigma}=m p_c$ дротів ($p_{\sigma}=80$). Максимальне значення синфазної напруги зменшується до прийняттого на практиці рівня, при майже однаковій кількості дротів, однак при цьому потрібно використати ще m додаткових комутаторів. Для послідовно сполучених ТО у межах поверху потрібно $p_n=2(m+1)$ дротів ($p_n=18$), $U_{nmax}=2(m+1)U_{TO}=9$ В, а в межах будинку потрібно $p_{\sigma}=m p_n$ дротів ($p_{\sigma}=162$). Цей варіант є гірший від попереднього через суттєве (більш як удвічі) зростання кількості з'єднувальних дротів. Тільки в матричних комутаторах порівняно з іншими використовується мінімальна кількість з'єднувальних дротів $p_{\sigma}=m+n$ (для випадку двопровідної лінії зв'язку). При використанні діодних температурних сенсорів, які знаходяться в точках перетину горизонтальних та вертикальних ліній і працюють в режимі з модуляцією вимірювального струму [5], за умови вибору його значення, як було показано вище, більшим від максимально можливого значення зворотного струму р-п-переходу, можна забезпечити інваріантність як до впливу параметрів комутаторів, з'єднувальних проводів, так і конструктивно-технологічного розкиду характеристик діодів. Однак, використовуючи ТО, як зазначено вище, можна досягнути у декілька разів вищої чутливості.

Структурна схема розробленого авторами матричної багатоканальної вимірювальної системи для обліку спожитої теплової енергії наведена на рисунку. На опалювальних приладах кожного поверху розташовується $M=2m$ ТО, що підключаються до вторинного приладу системи чотирьохпроводною лінією зв'язку, пара струмових дротів якої перемикається комутаторами СК1 та СК2, а пара потенціальних – комутаторами ПК1 та ПК2. Вимірювальний струм через ТО перемикається парою діодних ключів V_{j1i} , V_{j2i} (де $j=1, \dots, n$ – поточний номер поверху, $i=1, \dots, M$ – поточний номер ТО на поверсі), кожен з яких, у свою чергу, комутується парою струмових комутаторів СК1 та СК2. Один із потенціальних виводів кожного з ТО у межах стояка підключений до окремого вертикального потенціального з'єднувального дроту, а його інший потенціальний вивід у межах поверху підключений до окремого горизонтального потенціального з'єднувального дроту. Вертикальні потенціальні з'єднувальні дроти підключаються до входу ВП потенціальним комутатором ПК1, а горизонтальні – комутатором ПК2. До струмових виводів комутаторів СК1 та СК2, відповідно, С1 та С2, під'єднаний генератор вимірювального струму (ГС), а потенціальні виводи комутаторів ПК1 та ПК2, відповідно П1 та П2, підключені до інформаційних входів ВП. Для забезпечення інваріантності результатів вимірювання до вимірювального струму його значення задається від джерела напруги U і одночасно від цього ж джерела формується опорна напруга для аналогоцифрового перетворювача (АЦП) ВП. Вторинний прилад на сьогодні може складатись з АЦП, блока керування (мікропроцесорний контролер) та блока відображення вимірювальної інформації і може бути виконаний на декількох мікроелектронних елементах.



*Структурна схема багатоканальної системи
обліку спожитої теплової енергії*

Результат вимірювання температури отримується за цикли перетворення при різних значеннях вимірювального струму $I_{\theta 1}$, $I_{\theta 2}$

$$I_{\theta 1} = \frac{U + \Delta_{ГС}}{R_N},$$

$$I_{\theta 2} = \frac{kU + \Delta_{ГС}}{R_N},$$
(8)

де U – опорна напруга генератора вимірювального струму (ГВС); k – коефіцієнт поділу опорної напруги ГВС; $\Delta_{ГС}$ – еквівалентна адитивна складова похибки ГВС; R_N – опір струмозадавального резистора.

В кожному з циклів перетворення спади напруги $U_{\theta 1}$, $U_{\theta 2}$ на ТО

$$\begin{aligned} U_{\theta 1} &= I_{\theta 1} R_{\theta} = (U + \Delta_{ГС}) \cdot \frac{R_{\theta}}{R_N} + e_k, \\ U_{\theta 2} &= I_{\theta 2} R_{\theta} = (kU + \Delta_{ГС}) \cdot \frac{R_{\theta}}{R_N} + e_k, \end{aligned} \quad (9)$$

де $R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta)$, R_0 – опір ТО при температурах, відповідно, θ та 0°C ; α – температурний коефіцієнт опору ТО; e_k – контактна ЕРС, яка виникає на дротах лінії зв'язку; за допомогою АЦП перетворюються в коди N_i . Для забезпечення інваріантності результатів перетворень до значення вимірювального струму як опорна напруга для АЦП використана поділена на n разів опорна напруга ГВС. Код результату перетворення N_X отримується як різниця кодів отриманих в обох циклах перетворення

$$N_X = N_1 + N_2 = k_{АЦП} \frac{U_{\theta 1} + U_{\theta 2}}{nU} = k_{АЦП} \frac{1-k}{n} \cdot \frac{R_{\theta}}{R_N}. \quad (10)$$

Для отримання коду результату вимірювання температури N_{θ} від коду N_X слід відняти код, який відповідає опору R_0 ТО

$$N_{\theta} = N_X - N_0 = k_{АЦП} \cdot \frac{1-k}{n} \cdot \frac{R_0}{R_N} \cdot \alpha\theta. \quad (11)$$

Висновки

1. Для побудови будинкових систем індивідуального обліку спожитої теплової енергії без врізування в тепломережу доцільно використати матричний багатоканальний принцип побудови, що значно зменшує кількість з'єднувальних дротів.

2. При використанні напівпровідникових сенсорів за умов вибору їх вимірювального струму більшим від максимально можливого зворотного струму р-п-переходу та імпульсній модуляції цього струму забезпечується інваріантність вимірювання до опорів замкнених ключів комутаторів, з'єднувальних дротів, контактних ЕРС. Завдяки двопровідній лінії зв'язку сенсорів та матричній їх комутації забезпечується мінімальна кількість з'єднувальних дротів, яка дорівнює сумарній кількості горизонтальних та вертикальних з'єднувальних ліній.

3. При використанні термоперетворювачів опору забезпечується майже на порядок більша чутливість перетворення, але й удвічі збільшується кількість з'єднувальних дротів. За умови модуляції вимірювального струму термоперетворювачів опору корегується адитивна складова похибки всього тракту перетворення, а завдяки чотирипровідному підключенню забезпечується інваріантність результату вимірювання до опорів з'єднувальних дротів та замкнених ключів комутатора.

1. Тимчасові правила відпуску та обліку спожитої теплової енергії. – Держ. Комітет України з житлово-комунального господарства. – К., 1996. – 66 с. 2. Патент 32611 (UA). 3. Лилак В.І., Столярчук П.Г., Яцук В.О. Прецизійні канали вимірювання температури для атомної енеогетики // Вісн. Харківського держ. політех. ун-ту. – 1999. – Вип. 71. – С. 83–87. 4. *Microsensors. Principles and Applications*. J. W. Gardner. – J. Willey & Sons, Chichester, England, 1994. – 331 p. 5. Патент 23280 (UA). 6. Степаненко І.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: – Энергия, 1977. – 672 с. 7. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков И.А. Полупроводниковые приборы. – М., Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.