

8. Бляут, Ю. Є. Енергоощадна технологія для антипомпажного керування відцентровими нагнітачами газоперекачувальних агрегатів докачуючої компресорної станції підземного сховища газу [Текст] / Ю. Є. Бляут // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 2. – С. 33–38.
9. Мамонов, О. І. Впровадження енергозберігаючих технологій при протипомпажному керуванні нагнітачами [Текст] / О. І. Мамонов, В. О. Таргонський, В. В. Ніщета // Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз». – 2006. – № 1 (37). – С. 6–8.
10. Лагойда, А. І. Аналіз динамічних властивостей відцентрового нагнітача ГПА з газотурбінним приводом як об'єкта керування [Текст] / А. І. Лагойда, Ю. Є. Бляут, Є. М. Лесів, Г. Н. Семенцов // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 2 (18). – С. 72–85.
11. Олейников, В. А. Сборник задач и примеров по теории автоматического управления (оптимальное, экстремальное и программное управление) [Текст] / В. А. Олейников, Н. В. Соловьев, А. М. Пришвин, Н. С. Зотов. – М.: Высшая школа, 1968. – 200 с.
12. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Г. Ф. Зайцев. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
13. Бляут, Ю. Є. Автоматична ідентифікація помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом для ефективного антипомпажного регулювання [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец.: 05.13.07 / Ю. Є. Бляут // Автоматизація процесів керування. – Івано-Франківськ, 2013. – 20 с.

*Наведено математичну модель для визначення ефективності сонячних колекторів, яка дає можливість оцінювати ефективність їхньої роботи і оперативно здійснювати контроль при застосуванні сонячних колекторів. Визначення ефективності сонячних елементів дозволяє приймати рішення стосовно їх подальшого використання. Розроблено пропозиції щодо вдосконалення методик випробування сонячних колекторів завдяки підвищенню точності вимірювання основних складових*

*Ключові слова: сонячний колектор, теплоносій, термopетворювач, випромінювання, температура, ефективність, опір, калібрування*

*Приведена математическая модель для определения эффективности солнечных коллекторов, которая дает возможность оценивать эффективность их работы и оперативно осуществлять контроль при применении солнечных коллекторов. Определение эффективности солнечных элементов разрешает принимать решение относительно их дальнейшего использования. Разработаны предложения относительно усовершенствования методик испытаний солнечных коллекторов путем обеспечения высшей точности измерения основных составляющих*

*Ключевые слова: солнечный коллектор, теплоноситель, термопреобразователь, излучение, температура, эффективность, сопротивление, калибровка*

УДК 658.562

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27856

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

**П. Г. Столярчук**

Доктор технічних наук, професор завідувач кафедри\*

E-mail: stolyarchuk@lp.edu.ua

**М. М. Микійчук**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: mykolamm@ukr.net

**В. О. Яцук**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: vyatsuk@lp.edu.ua

**М. С. Міхалєва**

Кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник\*

E-mail: galmih@lp.edu.ua

**О. І. Шпак**

Кандидат технічних наук,  
молодший науковий співробітник\*

E-mail: oxana.shpakk@gmail.com

**Т. М. Олеськів**

Аспірант\*

E-mail: taras\_oleskiv@ukr.net

\*Кафедра метрології, стандартизації та сертифікації  
Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

### 1. Вступ

Сонячні перетворювачі, як джерело електроенергії, уперше почали застосовувати для енерго-

забезпечення космічних станцій більше 40 р. тому. Сьогодні сонячні батареї міцно ввійшли в буття як джерело екологічно чистої й безкоштовної енергії. Сонце завжди посилало й посилає на землю мільярди

кіловат променевої енергії і цей ресурс є практично необмежений.

За принципом роботи сонячні елементи являють собою фотоелектричні генератори постійного струму, які використовують ефект перетворення променевої енергії в електричну. Їх незаперечними перевагами є відносно малі габарити та маса, можливість автономної роботи за умови використання акумуляторів, а до недоліків слід віднести у першу чергу відносно малу потужність, яку можна отримати з одиниці площі, що на практиці призводить до значного зростання габаритів систем енергозабезпечення з потужностями традиційно використовуваними на практиці. Для прямого перетворення сонячної енергії в теплову використовують сонячні колектори (СК), які поглинають сонячну енергію у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі випромінювання і в подальшому зазвичай підігрівають воду, яку можна використовувати для господарських потреб.

Тому перед розробниками стоїть завдання створення різного виду сонячних установок, в яких при найменших затратах найбільш ефективно зібрати потік енергії сонячного випромінювання і перетворити його в потрібний споживачеві вид енергії (теплоту, електроенергію тощо).

Випробувальне обладнання, що дозволяє визначати теплотехнічні і експлуатаційні характеристики СК і сонячних водонагрівальних установок (СВУ) сьогодні в Україні фактично відсутнє. Для випробувань СК вітчизняні виробники змушені звертатися до зарубіжних випробувальних центрів, або вносити в технічну документацію не стандартизовані теплотехнічні показники. Відсутність спеціалізованого випробувального устаткування і відпрацьованих методик випробувань стримує розробки нових конструкцій СК і СВУ, а також удосконалення існуючих конструкцій. Внесення доповнень в існуючі вітчизняні стандарти в частині теплових випробувань сонячних колекторів також можливе тільки після апробації і відпрацювання таких методик.

Ринок геліотехнічного обладнання потребує паспортизації та сертифікації сонячних колекторів. Вирішення цього завдання включає в себе створення стендового обладнання для комплексних випробувань СК і СВУ відповідно з міжнародними та вітчизняними стандартами та апробацію різних методик випробувань СК і СВУ, спрямованих на визначення теплотехнічної ефективності колекторів, їх надійності, на контроль якості виготовлення.

**2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Існує два основні способи перетворення сонячної енергії: фототермічний і фотоелектричний. В першому випадку теплоносії (найчастіше вода) нагрівається в колекторі до високої температури і використовується для обігріву приміщень чи інших потреб. Другий же спосіб – це пряме перетворення сонячного випромінювання в електричний струм з допомогою напівпровідникових фотоелементів – сонячних батарей [1].

Ефективність сонячних елементів насамперед визначається такими технічними характеристиками [2]:  
 – при площі сонячних елементів приблизно 0,2 м<sup>2</sup> потужність модуля становить приблизно 10 Вт;

- напруга при максимальному навантаженні – близько 25 В;
- струм короткого замикання становить близько 500 мкА;
- вага модуля близько 2 кг;
- приблизний ККД сонячного елемента – від 14 до 18 %;
- термін служби пластини не менше 25 р.

Незважаючи на порівняно низький ККД, сонячний елемент є найбільш ефективним джерелом електрики серед альтернативних і автономних джерел енергії. Однак через досить високу вартість сонячного перетворювача, а головне залежності від погодних умов, їх у більшості випадків позиціонують не як основне, а як додаткове джерело енергії. Тому сонячні перетворювачі мають свої ефективні переваги і недоліки, які представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Переваги і недоліки сонячних перетворювачів

Переваги:	Недоліки:
– тривалий термін служби;	– висока вартість і, як наслідок, тривалий строк окупності;
– незалежність від технічних неполадок енергогенеруючої організації;	– низький ККД у порівнянні із традиційними джерелами енергії;
– низька імовірність поломки;	– залежність від погодних умов;
– безкоштовність самої енергії (після того як у систему були вкладені чималі кошти);	– неможливе використання для приладів, що споживають велику потужність.
– немає необхідності постійної її обслуговувати.	

Математична модель сонячного колектора (СК), яка описана у [3], не визначає такого показника як витрата теплоносія. Із зростанням витрат теплоносія у СК зростає її ККД, але одночасно зростають витрати енергії на переміщення теплоносія. Згідно з [4], на практиці обирають витрати виходячи із співвідношення  $G_{CA} / F_{СК} U = 2 - 4$ , де (G, C<sub>A</sub> – витрати та теплоємність теплоносія, відповідно; F<sub>СК</sub> – площа поверхні теплоприймача; U – коефіцієнт теплових витрат). Це відповідає ефективності СК на рівні 86–90 % від максимально можливої за існуючих зовнішніх умов.

У [5] пропонується декілька шляхів підвищення ефективності напівпровідникових перетворювачів сонячної енергії: конструктивні вдосконалення наявних перетворювачів, технологічні вдосконалення (насамперед, звернення до нових матеріалів), нові принципи роботи сонячних батарей.

Для сонячних елементів з постійною продуктивністю для підвищення ефективності потрібно збільшити інтенсивність сонячного випромінювання. Для цього пропонують системи управління, які б визначали напрям сонячного випромінювання, відповідно до якого необхідно встановлювати сонячні панелі так, щоб їх площина знаходилась перпендикулярно до сонячного випромінювання [6]. Використання таких систем вимагає оптимізації режимів роботи систем орієнтування з метою зменшення енергозатрат і їх механічних переміщень [7].

Випробування сонячних колекторів регламентується стандартами ДСТУ ISO 9806-1:2005, ДСТУ ISO 9806-2:2005, ДСТУ ISO 9806-3:2005 [8, 9]. Тому важливою і актуальною проблемою сучасних випробувальних систем є розробка приймачів сонячного випромінювання, які б з високою точністю і чутливістю вимірювали енергетичні параметри оптичного випромінювання [10].

### 3. Ціль та задачі дослідження

В дослідженні поставлено за ціль оцінку ефективності СК, оскільки така оцінка дасть змогу приймати рішення стосовно подальшого використання колекторів. Також це дасть змогу порівнювати СК між собою за ККД.

Для вирішення поставленого завдання запропонуємо математичну модель ефективності СК, в основу якої покладено відношення кількості тепла, яке отримав СК до кількості променевого тепла, яке випромінювалось на його поверхню за певний проміжок часу.

Також ціллю дослідження буде висунути пропозиції щодо покращення методик випробувань СК. Для цього пропонуватиметься визначити і врахувати всі значення похибок, які виникають під час вимірювань параметрів СК і мають суттєвий вплив на кінцевий результат.

### 4. Визначення ефективності сонячних колекторів

Ефективність сонячного колектора за [8, 9] визначають за формулою:

$$\eta_{ск} = \frac{Q_{кор}}{Q_{пром}}, \tag{1}$$

де  $Q_{кор}$  – кількість тепла, що отримав сонячний колектор за час  $t$ ;  $Q_{пром}$  – кількість променевого тепла, що випромінювалась джерелом на одиницю поверхні теплопоглинач сонячного колектора за цей же час.

$$Q_{кор} = \frac{\dot{m} c_f \Delta T}{A_p G}, \tag{2}$$

де  $\dot{m}$  – масова швидкість потоку рідинного теплоносія;  $c_f$  – ефективна теплоємність рідинного теплоносія;  $A_p$  – загальна площа колектора або площа абсорбера;  $\Delta T$  – температура на виході  $t_e$  і вході  $t_{in}$  СК ( $T = t_e - t_{in}$ );  $G$  – поверхнева густина потоку випромінювання.

Показники, які характеризують  $Q_{кор}$ , являють собою показники корисності  $P_{кор}$ . Тоді  $Q_{кор}$  запишеться як функція від цих показників, тобто  $Q_{кор} = f(P_{кор})$ .

$$Q_{пром} = F \cdot E, \tag{3}$$

де  $F$  – площа теплопоглинач сонячного колектора;  $E$  – інтенсивність променевого теплового потоку, що випромінює джерело.

Показники  $F$ ,  $E$ , які характеризують  $Q_{пром}$  представимо як показники інтенсивності  $P_{інт}$ . Тоді  $Q_{пром}$  можна буде записати як функцію від показників інтенсивності, тобто  $Q_{пром} = f(P_{інт})$ .

Тоді ККД СК представиться у вигляді залежності від частка двох функцій

$$\eta_{ск} = \frac{f(P_{кор})}{f(P_{інт})} = \frac{\dot{m} c_f \Delta T}{A_p G F E}. \tag{4}$$

При побудові математичної моделі з двома змінними вид залежності, яка адекватно відобразить причинно-наслідкові зв'язки певного процесу чи явища, визначимо з врахуванням кількості показників при визначенні ККД СК. Щоб визначити залежність між двома показниками застосуємо основну формулу нелінійних регресійних моделей, у цьому випадку це представлення математичної моделі у вигляді поліноміальної функції. Оскільки для визначення ефективності СК використовується два показники ( $Q_{кор}$ ,  $Q_{пром}$ ), то дана математична модель може бути представлена поліномом другого порядку, тобто параболічною функцією.

Оскільки менша кількість сонячного випромінювання на СК припадає на ранкові та вечірні години, а більша кількість – на обідні години, то власне саме параболічна функція буде описувати закон розподілу приймання сонячної енергії сонячним колектором. Отже, ефективність сонячного випромінювання  $E$  змінюється в залежності від періоду дня  $t$  (ранок, обід, вечір).

Показники корисності та інтенсивності СК, за допомогою яких визначається кількість тепла, що отримує СК за певний проміжок часу та кількість променевого тепла, що випромінюється джерелом за той самий проміжок часу, відтворюють коефіцієнт корисної дії СК [8, 9]. Даний ККД при відповідних методах випробувань та вимогах нормативних документів до цих методів випробувань утворюють математичну модель ефективності СК, яка передбачає класифікацію ефективної роботи СК і призводить до призначення для застосування СК. Схематична процедура визначення ефективності СК представлена на рис. 1.

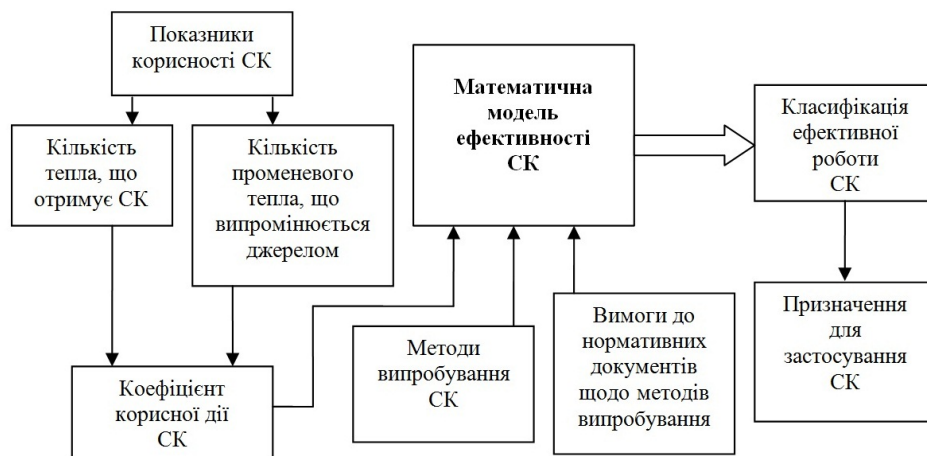


Рис. 1. Процедура визначення ефективності сонячного колектора

Дана математична модель може бути представлена у вигляді параболічної функції. Використаємо формулу (1) для представлення ефективності СК у вигляді математичної моделі. Цю математичну модель можна подати у вигляді такого співвідношення:

$$\frac{m c_f \Delta T}{A_p G F E} = \eta_0 \frac{1 + a_1 x_i + a_2 x_i^2}{1 + b_1 x_j + b_2 x_j^2} \Rightarrow \text{opt} . \quad (5)$$

Розв'язавши дану рівність знаходимо  $x_i, x_j$ , що і буде характеризувати ефективність роботи СК. Модель ефективності зводиться до наступного співвідношення  $x_i, x_j \Rightarrow \eta_{\text{opt}}$ . Це пропонується представити проміжком  $0,2 \leq \eta \leq 1$ , який розбивається на чотири відрізки в залежності від призначення для застосування СК.

Відрізок  $0,2 \leq \eta < 0,36$  представляє малоефективну роботу СК, відрізок  $0,37 < \eta < 0,62$  представляє помірно ефективну роботу СК, відрізок  $0,63 < \eta < 0,79$  представляє ефективну роботу СК, відрізок  $0,80 < \eta \leq 1$  представляє дуже ефективну роботу СК. Ці чотири співвідношення ( $0,2 \leq \eta < 0,36$ ;  $0,37 < \eta < 0,62$ ;  $0,63 < \eta < 0,79$ ;  $0,80 < \eta \leq 1$ ) відповідають чотирьом варіантам оптимізаційної задачі. Дані умови конкретизують умови оптимізації, тобто сприяють прийняттю рішень стосовно подальшого використання різних типів СК.

### 5. Пропозиції щодо вдосконалення методик випробування сонячних колекторів

Очевидно, що однією з основних характеристик сонячних колекторів є їх ККД, значення якого  $\eta$  може бути встановлено експериментально та розраховане за наступним співвідношенням [9]:

$$\eta = \frac{v_m \cdot t c_f \Delta T}{A_G G} , \quad (6)$$

де  $v_m$  – масова швидкість потоку рідини;  $c_f$  – питома теплоємність рідинного теплоносія;  $\Delta T$  – різниця температур на вході та на виході;  $t$  – час вимірювання;  $A_G$  – загальна площа колектора;  $G$  – загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінювання.

Із співвідношення (6) можна визначити межу допустимих значень відносної похибки  $\delta_\eta$  обчислювання ККД СК:

$$\delta_\eta = \delta_{v_m} + \delta_t + \delta_c + \delta_{\Delta T} + \delta_{A_G} + \delta_G , \quad (7)$$

де  $\delta_{v_m}, \delta_t, \delta_c, \delta_{\Delta T}, \delta_{A_G}, \delta_G$  – відносні похибки визначення, відповідно, масової швидкості потоку, часу вимірювання, питомої теплоємності рідинного теплоносія, вимірювання різниці температур, площі СК та загальної поверхневої густини потоку випромінювання.

В нормативних документах [9] подано рекомендації щодо підтримання масової швидкості потоку рідини з похибкою  $\delta_{v_m} \leq \pm 1\%$  та допустимого відхилення поверхневої густини потоку сонячного випромінювання  $\Delta G \leq \pm 50 \text{ Вт/м}^2$ , що при значенні рекомендованої нормативними документами поверхневої густини потоку сонячного випромінювання  $G = 800 \text{ Вт/м}^2$  дає можливість оцінювати значення  $\delta_G \approx \pm 50/800 \approx \pm 6\%$  [9]. Очевидно, що значення паспортного параметру

СК  $A_G$  встановлено виробником з похибкою, меншою від  $\delta A_G \leq \pm 1\%$ , а значення відносних похибок питомої теплоємності рідинного теплоносія за нормативними документами  $\delta_c \leq \pm 0,02\%$  [9]. Під час використання звичайних побутових хронометрів з абсолютною похибкою вимірювання  $\Delta t \leq \pm 1$  с відносна похибка вимірювання рекомендованих нормативними документами проміжків часу  $t \geq \pm 15$  хв не перевищуватиме  $\delta_t \leq \pm 0,1\%$  [9]. За вимогами нормативних документів мінімальне значення різниці вимірювальних температур не повинно бути меншим  $\Delta T_{\text{min}} \geq 1,5 \text{ К}$ , що із врахуванням абсолютної похибки вимірювання різниці температур  $\Delta \Delta T \leq \pm 0,1 \text{ К}$  дає значення її відносної похибки  $\delta_{\Delta T} \approx \pm 6,7\%$  [9]. Це значення є співмірним із значенням відносної похибки визначення повної густини потоку сонячного випромінювання і тоді із врахуванням критерію малості межа допустимих значень відносної похибки вимірювання значення ККД можна оцінити як  $\delta_\eta \approx \delta_G + \delta_{\Delta T} \approx \pm 13\%$ . У випадку оцінювання ККД сучасних СК, значення якого є невеликим та знаходиться на рівні десятків відсотка (наприклад,  $\eta = 20\%$ ), то абсолютна похибка вимірювання ККД становитиме  $\Delta \eta = \eta \cdot \delta_\eta = 0,2 \cdot 0,13 = \pm 2,6\%$ . Таке велике значення похибки вимірювання ККД практично не дозволяє порівнювати між собою за тепловою ефективністю СК різних виробників, ККД яких можуть відрізнятися лише на декілька відсотків.

Очевидно, що за мінімального значення різниці температур визначення значення теплового ККД за умови, що зменшений температурний перепад  $T_i^* = (t_{in} - t_a)/G$  прямує до нуля, де  $t_{in}, t_a$  – відповідно, вхідна температура колектора та температура довкілля [9]. Нормативні документи пропонують отримувати залежності поточного ККД як функцію зменшеного перепаду температур  $T_i^*$  [9]:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_i^* - a_2 G (T_i^*)^2 , \quad (8)$$

де  $\eta_0$  – ККД СК за умови, що мінімальне значення зменшеного перепаду температур  $T_i^*$  прямує до нуля;  $a_1, a_2$  – сталі, значення яких знаходять за методом найменших квадратів.

З огляду на це пропонується в уставах для випробувань СК передбачити заходи для підвищення точності вимірювання різниці температур СК та температур довкілля, вхідної та вихідної температури колектора.

Зроблений аналіз показав, що виходячи з вказаних вище особливостей, як сенсори температури найдоцільніше використати малогабаритні плівкові платинові термоперетворювачі опору (ТО) [14]. Платинові термоперетворювачі опору мають високу точність, стабільність в часі, широкий температурний діапазон вимірювання та добрі електричні властивості, які встановлені європейським стандартом DIN EN 60 751 [12]. Згідно із стандартом DIN-IEC 751 при зміні температури в діапазоні від  $0^\circ\text{C}$  до  $850^\circ\text{C}$  межі допустимих значень похибки платинових термоперетворювачів опору класу А становлять  $\Delta \theta = \pm (0,15^\circ\text{C} + 0,002|\theta|)$  [13].

З використанням платинових ТО для вимірювання різниці температур виникає ряд похибок: похибки з'єднувальних ліній, перегріву терморезисторів ви-

мірювальним струмом, АЦП, похибки самих ТО. Для того, щоб похибка з'єднувальних ліній була нехтівно малою, можна застосувати послідовне з'єднання високоомних ТО. Похибкою від перегріву термоперетворювачів вимірювальним струмом можна знехтувати, якщо використовувати відносно низькі струми, що допускається при застосуванні сучасних прецизійних АЦП, похибку яких, до речі, теж можна не враховувати у порівнянні з похибкою самих ТО [14, 15]. При побудові пристрою для вимірювання різниці температур можна використати прецизійний АЦП типу AD7711 [16].

Для вимірювання різниці температур запропоновано пристрій, схема якого представлена на рис. 2.

З огляду на це для відносно невеликих значень різниці температур (при  $B\Theta^2 \ll A\Theta$ ) різницю опорів сенсорів можна подати як:

$$N_X = \frac{k_{ADC}}{R_N} \sum_{i=1}^n (R_{\Theta_{1i}} - R_{\Theta_{2i}}) = \frac{k_{ADC}}{R_N} \sum_{i=1}^n [R_{0i1} (1 + A_{\Theta_{1i}} \Theta_1 + B_{\Theta_{1i}} \Theta_1^2) - R_{0i2} (1 + A_{\Theta_{2i}} \Theta_2 + B_{\Theta_{2i}} \Theta_2^2)] \approx$$

$$\approx \frac{k_{ADC}}{R_N} \sum_{i=1}^n \{ R_{0i1} (1 + \delta_{0i1}) [1 + A_{\Theta_{1i}} (1 + \delta_{A\Theta_{1i}}) \Theta_1] - R_{0i2} (1 + \delta_{0i2}) [1 + A_{\Theta_{2i}} (1 + \delta_{A\Theta_{2i}}) \Theta_2] \} =$$

$$= \frac{nk_{ADC} R_{0i1} A_{\Theta_{1i}}}{R_N} \left[ (\Theta_1 - \Theta_2) + \frac{1}{n A_{\Theta_{1i}}} \sum_{i=1}^n (\delta_{0i1} - \delta_{0i2}) + \Theta_1 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_{0i1} + \delta_{A\Theta_{1i}}) + \Theta_2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_{0i2} + \delta_{A\Theta_{2i}}) \right], \quad (9)$$

де  $R_{0i1}$ ,  $A_{\Theta_{1i}}$  – номінальні значення, відповідно, початкового опору та температурного коефіцієнту опору ТО;  $\delta_{0i1}$ ,  $\delta_{0i2}$  – відносні похибки підгонки початкових опорів  $R_{0i1}$  та  $R_{0i2}$  ТО;  $\delta_{A\Theta_{1i}}$ ,  $\delta_{A\Theta_{2i}}$  – відносні похибки температурних коефіцієнтів опору ТО;  $n$  – кількість ТО, що послідовно з'єднані.

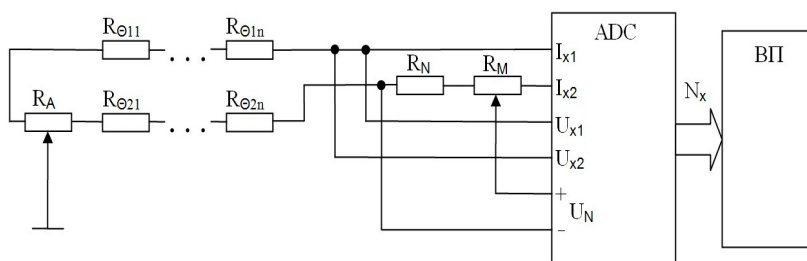


Рис. 2. Структурна схема пристрою для вимірювання різниці температур

Як показує аналіз співвідношення (9), для суттєвого зменшення впливу складових похибок  $\delta_{0i1}$ ,  $\delta_{0i2}$ ,  $\delta_{A\Theta_{1i}}$ ,  $\delta_{A\Theta_{2i}}$  можна використати метод усереднення, метод калібрування та метод введення поправок. Метод усереднення базується на використанні послідовно-паралельно сполучених ТО із зменшенням результуючої похибки в  $\sqrt{n}$  разів, особливо, якщо використані ТО з однієї партії. наприклад, для АЦП типу AD7711  $I_{X1} \approx I_{X2} = 200$  мкА, значення вхідної напруги  $U_{in} \leq 2$  В, і до кожного з його входів можна під'єднати до  $n=100$  ТО класу А, при цьому адитивна складова похибки вимірювання різниці температур не перевищуватиме  $\pm 0,15K/\sqrt{n} = 0,015K$ . Тоді, під час вимірювання означеного вище мінімального значення різниці температур  $\Delta T \leq 1,5$  К значення її відносною похибки становитиме вже  $\delta_{\Delta T} \leq \pm 1$  %. У цьому випадку відносна похибка визначення ККД СК визначається тільки відносною

похибкою загальної поверхневої густини потоку випромінювання.

Основним недоліком методу усереднення є необхідність у використанні великої кількості ТО, що суттєво здорожує випробувальну устатку. Метод калібрування полягає в уведенні в структуру вторинного приладу засобів адитивного та мультиплікативного підстроювань загальної функції перетворення. Для адитивного підстроювання в структурі цифрового термометра слід використати змінний резистор  $R_A$  та шляхом зміни його опору встановлювати нульовий показ вимірювача різниці температур за умови, що усі ТО знаходяться за однакової температури. Мультиплікативним підстроюванням шляхом зміни опору резистора  $R_M$  досягають певного показу  $\Delta T = \Theta_1 - \Theta_2$  вимірювача різниці температур, за умови, що перша група з  $n$  ТО знаходиться в термостаті з температурою  $\Theta_1$ , а друга група з  $n$  ТО – в іншому термостаті з температурою  $\Theta_2$ .

Нарешті, під час використання методу введення поправок немає необхідності у використанні змінних резисторів, але в структурі вимірювача різниці тем-

ператур повинен бути енергонезалежний оперативний запам'ятовувачий пристрій (ЕНОЗП) та клавіші для фіксації значення адитивної та мультиплікативної поправок. Під час визначення адитивної поправки обидві групи ТО повинні знаходитись за однакових температур  $\Theta_1 = \Theta_2$ , при цьому код показу цифрового табло  $N_0$  запам'ятовується в ЕНОЗП і в подальшому як адитивна поправка  $N_a = -N_0$  підсумовується з поточним значенням  $N_X$  отриманого коду вимірювання та підраховується його скориговане значення  $N_{X0} = N_X + N_a$ . Після цього одна група ТО поміщається в термостат з температурою  $\Theta_1$ , а друга – в інший термостат з температурою  $\Theta_2$ .

Пристрій за схемою на рис. 2 можна використовувати і для вимірювання температури. У цьому випадку використовується лише одна група ТО, наприклад, для вимірювання температури  $\Theta_1$ , а на місце другої групи ТО доцільно під'єднати зразковий резистор  $R_{0N} = nR_0$ , де  $R_0$  – початкове значення ТО. Код результату вимірювання температури  $\Theta_1$  із врахуванням наявності підстроювальних резисторів  $R_A$  та  $R_M$  подається як:

$$N_{\Theta} = \frac{k_{ADC}}{R_N \pm r_M} \left[ \frac{I_{X1}}{I_{X2}} \left( \sum_{i=1}^n R_{\Theta_{1i}} + \frac{R_A}{2} \pm r_A \right) - \frac{R_A}{2} - R_{0N} \pm r_A \right], \quad (10)$$

де  $r_A$  – опір змінного резистора  $R_A$  між його движком та точкою під'єднання до резистора  $R_{0N}$ ;  $r_M$  – частина опору змінного резистора  $R_M$  між його движком та точкою під'єднання до резистора  $R_N$ .

Із врахуванням похибок ТО, нехтуючи похибками вище другого порядку малості, вираз для його опору запишеться як:

$$R_{\Theta_i} = R_{0H} (1 + \delta_{0i}) \left[ 1 + A_H (1 + \delta_{Ai}) \Theta_1 + B_H (1 + \delta_{Bi}) \Theta_1^2 \right] \cong \\ \cong R_{0H} W_{\Theta_1} + R_{0H} \delta_{0i} W_{\Theta_1} + R_{0H} (\Delta A_i \Theta_1 + \Delta B_i \Theta_1^2), \quad (11)$$

де  $W_{\Theta_1} = 1 + A_H \Theta_1 + B_H \Theta_1^2$ ;  $A_H, B_H$  – номінальні значення коефіцієнтів залежності Календара;  $\Delta A_i = A_H \delta_{\Delta A_i}$ ;  $\Delta B_i = B_H \delta_{\Delta B_i}$ .

Тепер співвідношення (10) можна записати так:

$$N_{\Theta} = \frac{k_{ADC}}{R_N \pm r_M} \left\{ \left[ nR_{0H} + R_{0H} \delta_{0cp} - R_{0N} \pm 2r_A \right] + nR_{0H} (W_{\Theta_1} - 1) + \right. \\ \left. + R_{0H} (W_{\Theta_1} - 1) n \delta_{0cp} + R_{0H} \sum_{i=1}^n (\Delta A_i \Theta_1 + \Delta B_i \Theta_1^2) \right\}, \quad (12)$$

де  $\delta_{0cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{\Theta_i}$ .

З аналізу співвідношення (12) робимо висновок про те, що зміною опорного резистора  $R_A$  завжди можна досягнути коригування адитивної похибки термометра при  $\Theta_1=0$ , при цьому буде виконувати співвідношення  $nR_{0H} + R_{0H} \delta_{0cp} - R_{0N} \pm 2r_A = 0$ .

Для коригування мультиплікативної складової похибки сенсори термометра слід помістити в термостат з точно відомою температурою  $\Theta_{1K}$  та зміною резистора  $r_M$  досягнути його показів, що відповідають значенню  $\Theta_{1K}$ . При цьому вираз калібрувального коду записується як

$$N_{\Theta K} = \frac{k_{ADC} n R_{0H} (W_{\Theta_{1K}} - 1)}{R_{NM}} + \frac{k_{ADC} n R_{0H}}{R_{NM}} \left[ \pm r_{MN} (W_{\Theta_{1K}} - 1) + \right. \\ \left. + (W_{\Theta_{1K}} - 1) \delta_{0cp} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta A_i \Theta_{1K} + \Delta B_i \Theta_{1K}^2) \right], \quad (13)$$

де  $R_{NM} = R_N + R_M / 2$ ;  $r_{MN} = r_M / (R_N + R_M \cdot 0,5)$ .

Очевидно, що під час мультиплікативного коригування виконується таке співвідношення:

$$\pm r_{MN} (W_{\Theta_{1K}} - 1) + (W_{\Theta_{1K}} - 1) \delta_{0cp} + \\ + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta A_i \Theta_{1K} + \Delta B_i \Theta_{1K}^2) = 0. \quad (14)$$

Після проведення обох калібрувань значення поточного коду цифрового термометра визначатиметься так:

$$N_{\Theta} = k_{ADC} (W_{\Theta_1} - 1) \frac{n R_{0H}}{R_{NM}} + \\ + k_{ADC} \frac{n R_{0H}}{R_{NM}} \left\{ (W_{\Theta_1} - W_{\Theta_{1K}}) \Theta_1 + \right. \\ \left. + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \Delta A_i (\Theta_1 - \Theta_{1K}) + \Delta B_i (\Theta_1^2 - \Theta_{1K}^2) \right] \right\}. \quad (15)$$

## 6. Висновки

Для того, щоб можна було достовірно класифікувати ефективність роботи СК, в даній роботі пропонується математична модель, з допомогою якої можна оцінювати чи порівнювати за ефективністю різні типи СК. Згідно даної математичної моделі пропонується проміжок, на якому представлена ефективність роботи СК, розбитий на чотири відрізки, які представлятимуть, наскільки ефективний конкретний СК. Це дає змогу приймати рішення стосовно подальшого використання СК, залежно від того, на якому відрізку він знаходиться.

За результатами аналізів, зроблених в даній статті можна зробити висновок про дві домінуючі складові похибки обчислення ККД СК – похибка встановлення поверхневої густини сонячного випромінювання та похибка визначення різниці температур. Запропоновано заходи для зменшення похибки вимірювання різниці температур в декілька разів. Це дало змогу підвищення точності обчислення ККД СК приблизно в два рази.

## Література

1. Лучков, Б. Солнечный дом – солнечный город [Текст] / Б. Лучков // Наука и жизнь. – 2002. – № 12. – С. 26–31.
2. Сонячні батареї для будинку [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://energyka.com.ua/alternativnaya-energetika/161-sonyachni-batareji-dlya-budinku>
3. Горин, А. Н. Солнечная энергетика. (Теория, разработка, практика) [Текст] / А. Н. Горин, А. В. Дорошенко, М. А. Глауберман. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 374 с.
4. Daffi, J. A. Heat processes with the use of solar energy [Text] / J. A. Daffi, Y. A. Beckman. – Moscow: Mir., 1977. – 566 p.
5. Мачулін, В. Сонячна енергетика: порядок денний для світу й України [Текст] / В. Мачулін, В. Литовченко, М. Стріха // Вісник Національної академії наук України. – 2011. – № 5. – С. 30–39.
6. Нго, С. К. Повышение эффективности солнечных батарей с помощью следящей системы [Текст] / С. К. Нго // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 318–321.
7. Петрусєв, А. С. Повышение эффективности работы солнечных батарей с помощью одноосевой системы ориентирования [Текст] / А. С. Петрусєв, А. В. Юрченко, А. В. Охорзина // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 142–146.
8. Шаповал, С. П. Ефективність геліоустановки за різних кутів падіння теплового потоку на сонячний колектор [Текст] / С. П. Шаповал // Науковий вісник НЛТУ України. – 2009. – Вип. 19.6. – С. 117–120.
9. ISO 9806-1:1994 [Text] / Test methods for solar collectors – Part 1: Thermal performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop17.
10. Яцук, В. Метрологічне забезпечення випробувань сонячних колекторів [Текст] : міжнар. наук. – практ. конф. / В. Яцук, П. Столярчук, М. Микійчук, Р. Дяк, Х. Серкез, Т. Олескєв // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи. – Львів, 2013. – С. 150.

11. Яцук, В. Устава для визначення термоелектричної добротності сонячних термобатареї [Текст] : міжнар. наук.-практ. конф. / В. Яцук, В. Куба, Ю. Яцук, М. Микійчук // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи. – Львів, 2013. – С. 144.
12. Nau, M. Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern [Text] / M. Nau. – Fulda, Germany: JUMO GmbH & Co. KG, 2004. – 160 p.
13. Meijer, G. C. M. Smart Sensor Systems [Text] / G. C. M. Meijer – Delft: SensArt, 2008. – 385 p. doi: 10.1002/9780470866931
14. Яцук, В. О. Засоби моніторингу та реєстрації якості послуг із теплопостачання [Текст] / В. О. Яцук, П. В. Бугайцова, Ю. В. Яцук // Метрологія та прилади. – Науково-виробничий журнал. – 2013. – №4 (42) 2013. – С. 38–44.
15. Яцук, В. О. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінювання з електричним заміщенням [Текст] / В. О. Яцук, Ю. В. Яцук, Х. В. Серкез // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. : Автоматика, вимірювання та керування. – 2013. – № 753. – С. 25–30.
16. AD7711: LC2MOS Signal Conditioning ADC with RTD Excitation Currents Data Sheet [Electronic resource] / Available at: <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/ad7711/products/product.html>

*Для вирішення завдання дослідження умов експлуатації і впровадження деяких зразків кабелів в газотурбінних установках АО «МОТОР СИЧ» було визначено обсяг роботи, що складається з двох розділів: перший розділ був присвячений термометруванню характерних областей, місць прокладки кабельних ліній, при різних режимах навантаження в сталому режимі. Другий розділ присвячений випробуванню в заводських умовах кабелів і термоізоляційних труб при температурах, згідно термометруванню по першому розділу*

*Ключові слова: газотурбіна, електростанція, термометрування, електрокабели і термотруби*

*Для решения задачи исследования условий эксплуатации и внедрения некоторых образцов кабелей в газотурбинных установках АО «МОТОР СИЧ» был определен объем работы, состоящий из двух разделов: первый раздел был посвящен термометрированию характерных областей, мест прокладки кабельных линий, при разных режимах нагрузки в установившемся режиме. Второй раздел посвящен испытанию в заводских условиях кабелей и термоизоляционных труб при температурах, согласно термометрированию по первому разделу*

*Ключевые слова: газотурбина, электростанция, термометрирование, электрокабели и термотрубы*

УДК 621.438:621.315.2.002

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27788

## К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ОБРАЗЦОВ КАБЕЛЕЙ В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ АО «МОТОР СИЧ»

**В. М. Снигирев**

Кандидат технических наук, доцент\*

**А. И. Афанасьев**

Кандидат технических наук, доцент\*

**К. В. Дудник**

Зам. главного конструктора\*\*

**А. В. Куклин**

Инженер-конструктор\*\*

E-mail: lexrecer@rambler.ru

\*Кафедра электрических аппаратов

Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

\*\*Управление энергетических установок и

газоперекачивающих агрегатов

АО «МОТОР СИЧ»

пр. Моторостроителей, 15, г. Запорожье, Украина, 69068

### 1. Введение

Газотурбинные установки наземного применения включают в себя газотурбинный привод (ГТП), в отсеке которого необходимо прокладывать кабельные

линии, где при работе на номинальную мощность температура воздуха может достигать до 100 °С (с местами локального нагрева более 200 °С). Поэтому защита кабельных линий от высоких температур является актуальной задачей [1].