



Ахиска Р.

### Раши́т Ахиска

Університет Гази, факультет природничих наук,  
кафедра фізики, 06500 Текнікокullar,  
Анкара, Туреччина

## TEGPAS НОВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

---

*У роботі реалізовано нову систему експериментальних вимірювань, контролю й збору даних із програмувальним логічним контролером, що дає можливість здійснювати збір даних термоелектричного генератора з метою застосування термоелектричних модулів в якості термоелектричних генераторів. Для здійснення лабораторних експериментів з термоелектричним генератором створено систему циркуляції гарячої й холодної води. Одержуючи електричну енергію від термоелектричного генератора температури поверхонь термоелектричного генератора, значення струму й напруги на виході термоелектричного генератора, гарячі й холодні потоки вимірювалися миттєво. Усі ці дані безупинно контролювалися комп'ютером та реєструвалися програмою контролю й збору даних. У той же час в умовах без комп'ютера для контролю миттєвих даних термоелектричного генератора використовувалася панель оператора з можливістю зв'язку із програмувальним логічним контролером. Усі дані вимірювань термоелектричного генератора зібрано в нову систему експериментальних вимірів, контролю й збору даних. Установка системи експериментальних вимірювань реалізовано в системі термоелектричного генератора потужністю близько 10 Вт.*

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, програмувальний логічний контролер, SCADA, система експериментальних вимірів.

*In this study, a new test measurement system and supervisory control and data acquisition application with programmable logic controller has been carried out to be enable the collection of the data of thermoelectric generator for the usage of thermoelectric modules as thermoelectric generator. A hot-cold water circulator system has been established to carry out thermoelectric generator experiments in the laboratory. During the production of the electric energy from the thermoelectric generator, the temperatures of the surfaces of the thermoelectric generator, current-voltage values obtained from output of the thermoelectric generator, hot and cold flows have been measured by the system instantly. All these data have been monitored continuously from the computer and recorded by a supervisory control and data acquisition program. At the same time, in the environments where there was no computer, an operator panel with the ability to communicate with the programmable logic controller has been used for the monitoring of the instant thermoelectric generator data. All of the measurement data of the thermoelectric generator have been aggregated in the new test measurement and supervisory control and data acquisition system. The setup test measurement system has been implemented on the thermoelectric generator system with about 10W.*

**Key words:** thermoelectric generator, PLC, SCADA, test measurement system.

## **Вступ**

Потреби людства в енергії зростають з кожним днем. У зв'язку з обмеженою доступністю викопних видів палива, таких як нафта та вугілля, що використовуються у наш час, люди спрямовують зусилля на збільшення відновлюваних джерел енергії, а також на більш ефективне використання енергетичних ресурсів [1]. Якщо взяти до уваги зростання населення в світі, збільшення частки нових і відновлюваних джерел енергії то ефективне використання енергії неминуче. Якщо врахувати парниковий ефект від використання викопних видів палива, важливість відновлюваних й екологічно безпечних джерел енергії стає ще очевидніше [2]. Нині ведуться інтенсивні дослідження одержання енергії від відновлюваних джерел, таких як енергія вітру, сонця, біомаси, гідро, геотермальної та водневої. Термоелектричні генератори (ТЕГ) використовуються для перетворення геотермальної енергії, що є одним із джерел поновлюваної енергії, в електричну енергію [3]. Основним принципом ТЕГ є ефект Зеебека, відкритий 1821 року Томасом Зеебеком. Оскільки ТЕГ не мають рухливих механічних частин, вони довговічні, безшумні й нешкідливі та не вимагають значного техобслуговування [4]. З іншого боку, у зв'язку з низьким коефіцієнтом перетворення (близько 5%) застосування термоелектричної енергії обмежено [5]. Нині багато досліджень сконцентровано на збільшенні ККД термоелектричних генераторів. Винятком є ТЕ рекуперация відпрацьованого тепла, коли не обов'язково брати до уваги вартість споживання теплової енергії. Отже, низький ККД перетворення не є серйозним недоліком [6]. Термоелектричний модуль (ТЕМ) складається з низки термоелементів (від 3 до 127), з'єднаних електрично послідовно для підвищення робочої напруги й термічно паралельно для підвищення теплопровідності. ТЕГ перетворюють теплову енергію безпосередньо в електричну (ефект Зеебека) [7].

Для збору даних та випробування ТЕГ застосовувалося багато різних вимірювальних приладів. Для виміру миттєвих значень перевага надавалася ручним приладам. Плати збору даних використовувалися для передачі даних, отриманих в експериментах з ТЕГ, на персональний комп'ютер. Для реєстрації даних ТЕГ на персональному комп'ютері створюється або спеціальна програма, або застосовуються готові програми. Голд з колегами [8] спроектував термоелектричну вимірювальну систему, зручну для проведення експериментів з вимірювання мікроелектричних характеристик і генерування потужності термоелектричних модулів. Їх устаткування складалося зі стандартної програми National Instruments Labview, плати збору даних, термопарного блоку реєстрації даних Pico Technology, ряду термопар Т-типу. Ця система була випробувана на генераторному модулі Melcor CP1.4-127-05L. Еклуд зі співавторами [9] застосовували плату збору даних. Хен зі співавторами [10] зберігав експериментальні дані в обладнанні збору даних (Yokogawa, DA100) для аналізу, після досягнення температури в усталеному режимі і вихідної напруги в системі ТЕГ. Кім [11] і Хейсіб зі співавторами [12] контролювали температуру нагрівача, основи тепловідводу й навколишнього середовища за допомогою термопар Т-типу, реєстратора даних (Agilent 34970A) і плати збору даних. Сіг зі співавторами [13] і Чампіер зі співавторами [14] контролювали всі дані ТЕГ за допомогою реєстратора даних і двох ручних вимірювальних приладів. Кушккомілер [15], Зоу зі співавторами [16] і Рінальді зі співавторами [17] застосовували ручні вимірювальні прилади.

У пропонованій роботі система збору даних і експериментальних вимірювань із програмувальним логічним контролером створена для вимірювання, випробування, реєстрації й аналізу даних, отриманих від ТЕГ. Усі результати вимірювань термоелектричного генератора об'єднані в нову систему експериментальних вимірів, контролю й збору даних. За допомогою цієї системи було виміряно температуру холодної і гарячої поверхні, потоки рідини, що пропускаються над гарячою й холодною поверхнями, струм, напруга та потужність ТЕГ. Миттєво вимірювані

значення контролювалися за допомогою панелі оператора, з'єднаної із програмувальним логічним контролером зі спеціально написаною програмою. Крім того, було написано програму збору й контролю даних (SCADA) з метою контролю й реєстрації значень даних вимірювань за допомогою персонального комп'ютера. Усі значення даних наочно показано на персональному комп'ютері за допомогою програми SCADA. Одночасно всі значення даних передані для аналізу в базу даних MySQL. Усі обчислення даних ТЕГ реалізовані й в операційній панелі, та в програмах SCADA.

## Експериментальна установка

### Базова структура ТЕГ

Структуру й еквівалентну схему ТЕГ наведено на рис.1. Базова структура ТЕГ, що використовує одержання електроенергії, складається з термоелектричних елементів.

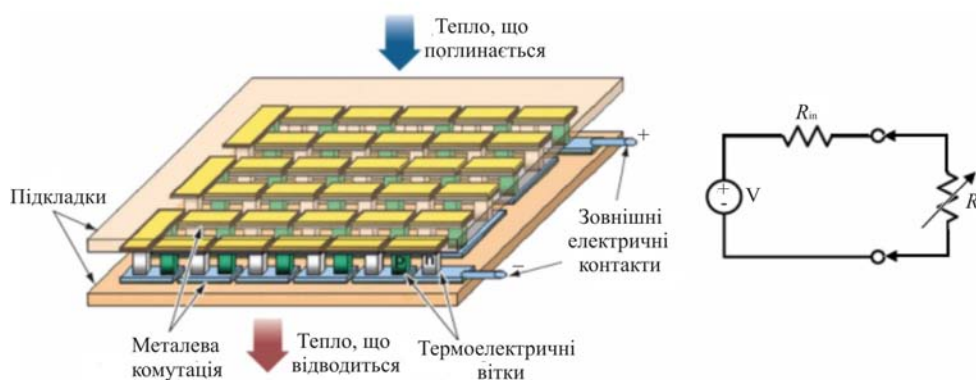


Рис. 1. ТЕМ у режимі генератора й еквівалентна схема ТЕМ.

Коли напівпровідники  $p$ - і  $n$ -типу з'єднані електрично послідовно і термічно паралельно, ТЕ модуль приводиться в дію [18]. ТЕ модулі звичайно розділяють на ТЕ генератори (ТЕГ) і ТЕ охолоджувачі (ТЕО). ТЕГ перетворюють теплову енергію, створювану градієнтом температури, в електричну енергію (ефект Зеєбека), тоді як ТЕО перетворюють електричну енергію в температурний градієнт (ефект Пельтьє) [7].

Електрична еквівалентна схема ТЕГ складається з ідеального джерела напруги  $V$  і внутрішнього опору  $R_{in}$ . Вона аналогічна еквівалентній схемі акумулятора. За наявності різниці температур між поверхнями на ТЕГ досягається напруга постійного струму. Якщо опір навантаження  $R_L$  підключений до ТЕГ, електричний струм проходить через опір навантаження і ТЕГ виробляє електричну потужність. Якщо різниця температур між поверхнями ТЕГ зростає, електрична потужність, отримана від ТЕГ, збільшується. Максимальний вихід потужності ТЕГ досягається, коли внутрішній опір  $R_{in}$  дорівнює опору навантаження  $R_L$ . З погляду застосувань ТЕГ вкрай бажано максимізувати вихід потужності [18].

### Експериментальна установка ТЕГ

Експериментальну установку ТЕГ показано на рис. 2. Основні частини експериментальної установки ТЕГ включають систему ТЕГ, систему циркуляції гарячої й холодної води, електронагрівник, поміщений між ТЕГ і автотрансформатором, що регулює тепло електричного

нагрівача, опір навантаження ТЕГ, систему SCADA із програмувальним логічним контролером, сенсори й передавачі.

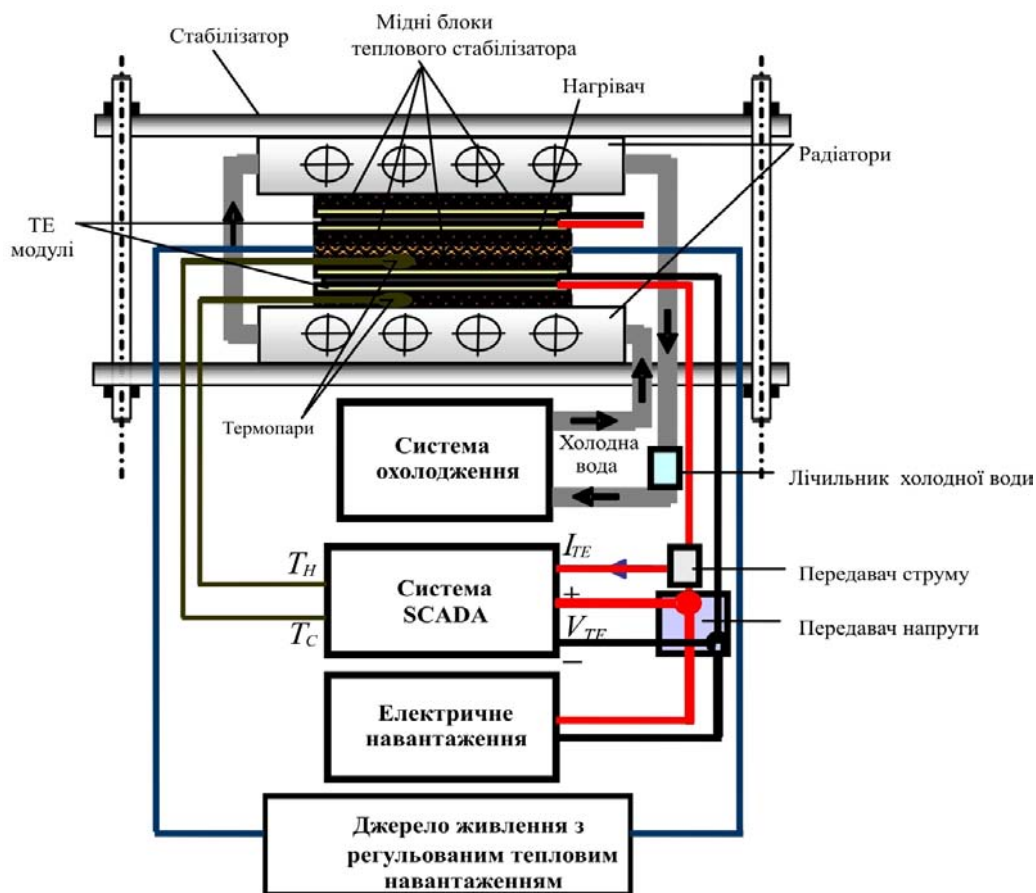


Рис. 2. Блок-схема системи ТЕГ експериментальної установки.

У системі ТЕГ використано два генератори Алтек-GM-1. Електричний нагрівач плоского прокату із хром-нікелевим дротом 500 Вт розміром 5×5 см використовується для створення підвищених температур гарячих поверхонь ТЕГ. Нагрівач стиснутий у формі сендвіча між двома ТЕГ, формуючи температури гарячої поверхні ТЕГ. Завдяки цьому електричному нагрівачу температура гарячої поверхні могла підвищуватися приблизно до 200 °С. Два радіатори розміром 5х5х0.8 см. створювали температуру холодної сторони, і через них за допомогою системи циркуляції пропускала холодна вода. Завдяки системі циркуляції гарячої й холодної води температура холодної води могла знижуватися приблизно до 5°С. У нашому дослідженні температура холодної сторони зберігалася постійною, тоді як температура гарячої сторони підвищувалася, оскільки потужність  $P$ , отримана від ТЕГ, залежить від різниці температур  $\Delta T$  між його поверхнями.

Для досягнення більш високої різниці температур ТЕГ температура гарячої поверхні підвищувалася за допомогою електричного нагрівача плоского прокату, оскільки температури гарячої води, що надходить із геотермальних областей, досягають 95°С і разом з температурою пари досягається значення близько 120 °С. Температура холодної води в областях застосування становить близько 15 °С. У цьому випадку різниця температур між гарячою й холодною водою підвищувалася до 100 °С. Різницю температур можна змінювати в широкому діапазоні 250 °С за допомогою електричного нагрівача плоского прокату. За допомогою цього були проаналізовані реакції ТЕГ під дією високої температури. Потужність електронагрівника змінювалася за допомогою автотрансформатора 2 кВА торговельної марки Artes Electronics Company. Для вимірювання

температур гарячих і холодних поверхонь застосовувалися термомпари  $T$ -типу. Максимальні значення температури, що сприймаються датчиками температури термомпари  $T$ -типу, можуть досягати  $350^{\circ}\text{C}$ .

Чотири мідні пластини термостабілізатора розміром  $4 \times 5 \times 0.2$  см було поміщено з кожної сторони ТЕГ. Дві термомпари  $T$ -типу як датчики температури було використано для вимірювання температури гарячої  $T_H$ , холодної  $T_C$  поверхні ТЕГ і для знаходження різниці температур між поверхнями. Як показано на рис. 2, ці термомпари було встановлено на мідній пластині між ТЕГ і приварено до пластини термостабілізатора. Для зменшення опору теплопровідності між холодною та гарячою поверхнями на ці поверхні наносилася силіконове змащення. Як опір навантаження був використаний резистор, масштабований і навитий із хром-нікелевого дроту потужністю 300 Вт.

### Система циркуляції гарячої й холодної води

Систему циркуляції гарячої й холодної води, створеної для проведення лабораторних експериментів з ТЕГ, показано на рис. 3. Основні частини системи включали резервуар для гарячої води, резервуар для холодної води, електронагрівач, два двигуни охолоджувача, два двопозиційні контролери, чотири двопозиційні вентиля подачі гарячої й холодної води, два двигуни циркуляції гарячої й холодної води та два лічильники.



*Рис. 3. Система рециркуляції гарячої й холодної води.*

*1 – резервуар для холодної води, 2 – резервуар для гарячої води, 3 – електронагрівач,  
4 – двигуни охолоджувача, 5 – двопозиційні контролери,  
6 – вентиля подачі гарячої/холодної води, 7 – циркуляційні двигуни, 8 – лічильники.*

У цій системі використано систему ТЕГ 10 Вт, а надалі для реалізації системи ТЕГ будуть використані системи 100 Вт і 1.5 кВт як джерела геотермальної енергії. Робочі характеристики ТЕГ реалізуються за підтримання постійного еталонного значення температури гарячої поверхні  $T_H$  і холодної поверхні  $T_C$ . Для цієї мети розроблена система циркуляції гарячої й холодної води, яка може застосовуватися як джерело гарячої води і як джерело холодної води. Для збільшення різниці температур між поверхнями ТЕГ температура холодної поверхні  $T_C$  максимально знижувалася й підтримувалася на найнижчому можливому рівні близько  $5^{\circ}\text{C}$ .

Під час експериментів температура гарячої поверхні ТЕГ забезпечувалася електронагрівачем

для вимірювання екстремальних температурних характеристик ТЕГ. Під час застосування в умовах експлуатації температура гарячої поверхні й температура холодної поверхні ТЕГ, що підлягає випробуванню, буде забезпечуватися геотермальною гарячою водою й холодною водопровідною водою відповідно. Температури геотермальних ресурсів і температури холодної водопровідної води досягають 120°C і <20°C відповідно. Труби й шланги в системі циркуляції гарячої й холодної води вибиралися таким чином, щоб витримувати 150°C.

Контроль систем гарячої й холодної води здійснюється окремо. В основі системи холодної води лежить класична система теплообміну повітряним охолодженням вода-повітря. Електронагрівник 2 кВт застосовувався для нагрівання води в резервуарі для гарячої води. Дві класичні системи охолодження застосовувалися для досягнення сильнішого охолодження. Вимірювання температур гарячої й холодної води здійснювався за допомогою термодатчиків Т-типу, а їх контроль – за допомогою двопозиційних контролерів температури Е-72 виробництва Elimko Company. Було обрано величину їх гістерезису 3°C. Для циркуляції гарячої й холодної води було використано два триступінчасті однофазні двигуни 80 Вт.

Іншим ефективним фактором при одержанні електрики від ТЕГ є потік води. Виміри потоку здійснювалися за допомогою двох лічильників ARF-4 НН виробництва Mikronet Company. Діапазон вимірювання лічильника становить 0.5-15 м<sup>3</sup>/сек.

У системі циркуляції гарячої і холодної води розміри резервуарів становили 49x69x60 см. Гаряча й холодна вода, протікаючи через гарячу й холодну поверхні ТЕГ, впливають один на одного, і між ними відбувається теплообмін. Для мінімізації такої взаємодії між цими поверхнями й навколишнім середовищем застосовувалася ізоляція з пінопласту товщиною 1 см. За температури навколишнього середовища 20°C, заповненню резервуарів гарячою й холодною водою й працюючої системи охолодження температуру холодної води можна було знизити приблизно до 5°C упродовж 6 годин. При цьому після невеликого зниження приблизно на 2°C, температура гарячої води в резервуарі залишилася приблизно 15°C. У такий же спосіб за температури навколишнього середовища 20°C, заповненні резервуарів гарячою й холодною водою й працюючою системою нагрівання температуру гарячої води можна було підвищити до 93°C упродовж 6 годин. При цьому після невеликого збільшення приблизно на 2°C, температура холодної води в резервуарі залишилася приблизно 19°C. За спільної експлуатації систем гарячої й холодної води їх температури досягаються через 7 годин. У цьому випадку температура гарячої води була близько 93 °C, а температура холодної води – близько 5 °C. Висновок: температури гарячої й холодної води в резервуарах майже не впливали один на одного завдяки ізоляції.

## **Система збору даних ТЕГ і SCADA**

### **Налаштування системи збору даних і випробування ТЕГ (TEG-DA-TS)**

Систему збору даних і випробування ТЕГ (TEG-DA-TS) створено для контролю та реєстрації даних, отриманих від ТЕГ, показана на рис. 4. Компоненти TEG-DA-TS, встановлені на DIN-рейці, включають джерело живлення постійного струму 24 В, програмувальний логічний контролер, модуль розширення термодатчиків, перетворювач напруги, перетворювач струму, панель оператора, кабель зв'язку між програмувальним логічним контролером і панеллю оператора, кабель зв'язку між програмувальним логічним контролером і персональним комп'ютером, персональний комп'ютер і два лічильники.

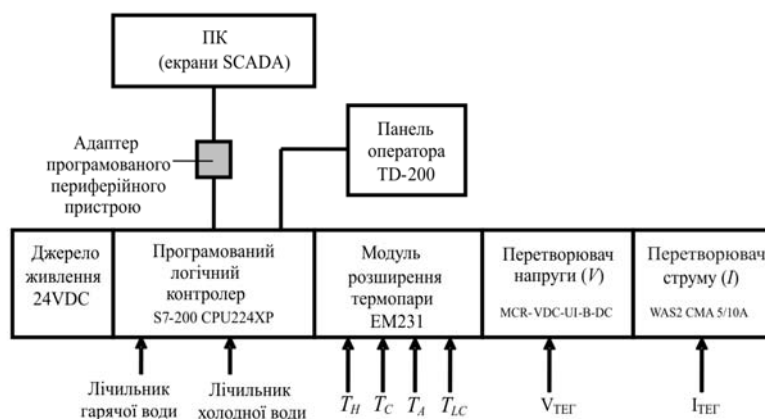


Рис. 4. Блок-схема системи збору даних і випробування ТЕГ.

Живлення системи забезпечувалося джерелом живлення постійного струму 24 В. Температури гарячої й холодної поверхні, температура навколишнього середовища  $T_A$  і температура поступаючої води  $T_{LC}$  вимірювалися чотирма термопарами Т-типу. Чотири термопары підключалися до програмувального логічного контролера S7-200 CPU224XP PLC через EM231. Аналогові температурні сигнали перетворювалися в цифрові сигнали за допомогою EM231. Перетворювач струму WAS2 CMA 5/10A DC марки Weidmüller і перетворювач напруги MCR-VDC-UI-B-DC марки Phoenix Contact застосовувалися для вимірювання кількості струму та напруги, отриманих від ТЕГ, відповідно. Завдяки використовуваним перетворювачам струму й напруги можна вимірювати до 10 А DC і 550 В DC відповідно. Аналогові вхідні сигнали програмувального логічного контролера AN0 і AN2 застосовувалися для перетворення значень струму й напруги в цифрові значення. В системі буде використано ТЕГ високої потужності 1.5 кВт. Два лічильники було використано для виміру потоків води, що проходять від холодних і гарячих поверхонь ТЕГ, та їх імпульси підключалися безпосередньо до входів DI1 і DI4 програмувального логічного контролера. Для реєстрації імпульсів лічильників застосовувалися два швидкісні лічильники програмувального логічного контролера.

Контроль усіх даних ТЕГ здійснювався за допомогою панелі оператора TD200 торговельної марки Siemens і програми SCADA. Використана панель оператора містить два рядки по 20 символів у кожній. Крім того, на ній є функціональні клавіші. Чотири температури, різниця температур між поверхнями, струм, напруга, потужність, гарячі й холодні потоки й розрахунки ефективності контролювалися через панель оператора в реальному часі. Калібрування струму, напруги й температур здійснювалася за допомогою багатофункціонального промислового калібратора Fluke 725.

### Програма програмувального логічного контролера

Програмувальний логічний контролер Siemens S7-200 є головним компонентом TEG-DA-TS. Програма для програмувального логічного контролера написана програмою Microwin. Вхідними даними для програмувального логічного контролера служать гарячі й холодні потоки, температури гарячої й холодної поверхні, температура навколишнього середовища, вихідний струм та вихідна напруга ТЕГ.

На програмувальному логічному контролері передбачено два комунікаційні порти. Завдяки цим портам дані програмувального логічного контролера контролюються з панелі оператора й

передаються в програму персонального комп'ютера SCADA. Вибір програмувального логічного інтерфейсу з одним портом зробив би неможливим одночасне використання панелі оператора й SCADA.

Алгоритм програми програмувального логічного контролера наведено на рис. 5. Вихід струму й напруги ТЕГ з'єднаний із входами  $A10$  і  $A12$  програмувального логічного інтерфейсу відповідно. Перетворювачі струму й напруги відкалібровані на аналоговий вихід 0-10 В. Завдяки наявності 16-розрядних регістрів на програмувальному логічному інтерфейсі, аналогові дані струму й напруги перетворені в 16-розрядні числа. Після необхідного масштабування значення струму, напруги й потужності було розраховано та передано в панель оператора й SCADA.  $DI1$  і  $DI2$ , входи швидкодіючих лічильників програмувального логічного контролера було використано для імпульсів гарячого й холодного потоків.  $DI1$  – це вхід швидкодіючого лічильника  $HSC3$ , а  $DI4$  – вхід  $HSC5$ . Без ініціювання цих  $HSC$  швидкодіючі лічильники рахують поточні імпульси безупинно.

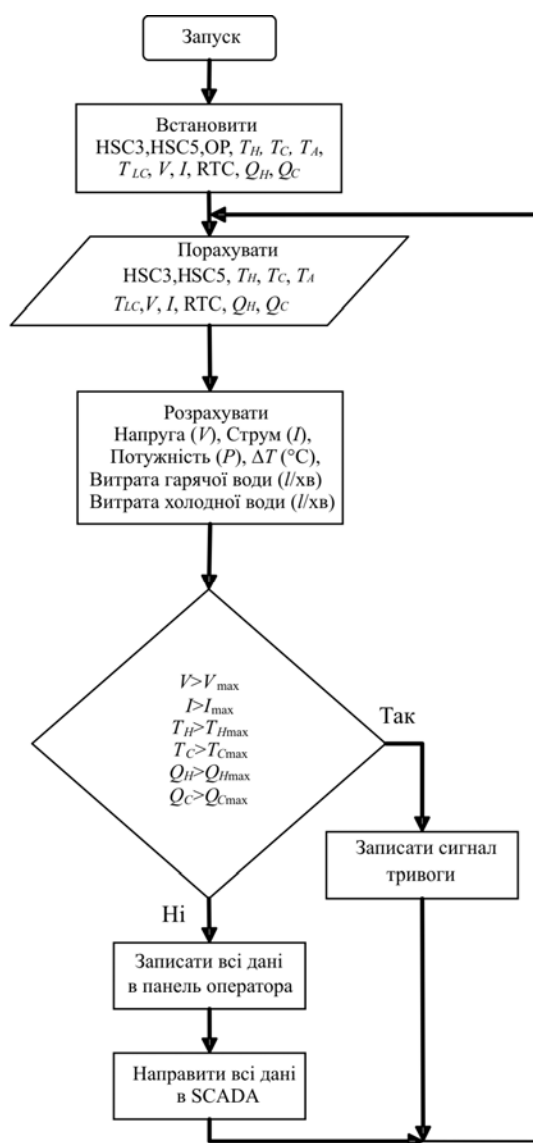


Рис. 5. Блок-схема програм програмувального логічного контролера.

Імпульси переривання або відсікання в  $HSC3$  і  $HSC5$  установлені на кожні 10 імпульсів. Лічильник 0 ( $C0$ ) і лічильник 1 ( $C1$ ) зростають на одне значення для витрати гарячої води й витрати холодної води з кожним перериванням відповідно. Щоб сформувати імпульс переривання



наприкінці кожних 10 імпульсів, було встановлено *HSC3* і *HSC5*. Програмувальний логічний контролер установлений на годинник реального часу, що дає можливість зробити розрахунки витрат у літрах/хв. Конфігурація *AI4*, *AI6*, *AI8* і *AI10* входів програмувального логічного інтерфейсу робить можливим реєструвати чотири температури. Записи температури вимірялися до 350 °С термопарами Т-типу.

Програму панелі оператора написано майстром програми *Microwin*. На панелі оператора є чотири меню: розрахунки, потоки, *I\_V\_P* і температури. Двоточковий інтерфейсний кабель (*PPI-485*) використаний для передачі всіх даних від програмувального логічного контролера до програми персонального комп'ютера *SCADA*.

## Програма SCADA

Інтерфейсну сторінку програми *SCADA* наведено на рис. 6. Програму *SCADA* написано програмним забезпеченням *WinTr SCADA*. Програма *SCADA* складається із чотирьох сторінок: температури, потоки, *V\_I\_P\_R* і всі дані. Користувач може легко одержати доступ до даних ТЕГ за допомогою сторінок *SCADA* і кнопок.



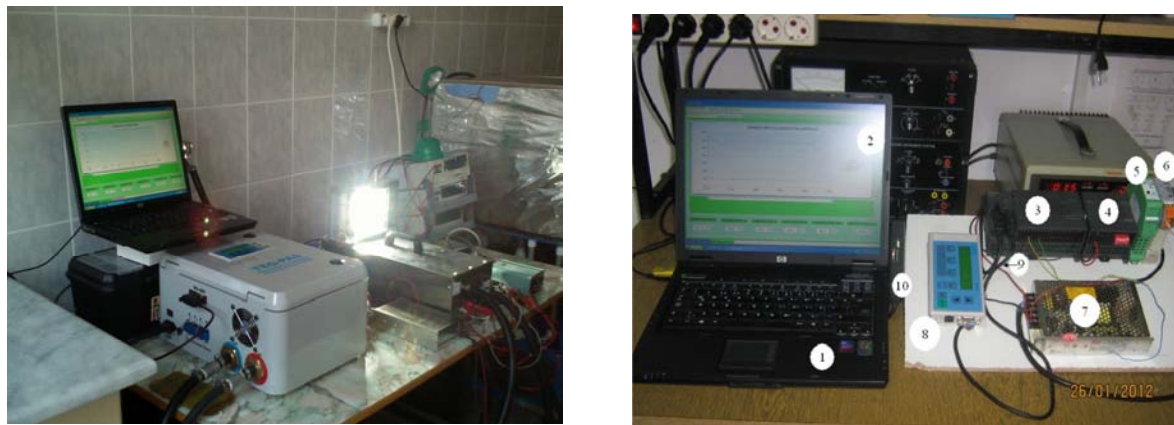
Рис. 6. Сторінка програми SCADA.

Параметри ТЕГ, оброблені в програмувальному логічному контролері, було передано в комерційно доступну програму *SCADA* по лінії комунікації *RS485*. Завдяки програмі *SCADA* усі дані ТЕГ було візуально показано на персональному комп'ютері. Процес передачі виконувався з послідовного порту персонального комп'ютера за допомогою протоколу передачі даних *RS485* зі швидкістю 9600 бод. Струм, напруга, потужність, холодні й гарячі температури, різниця температур, витрати гарячої й холодної води, значення різниці потоків були зареєстровані за «секундні» проміжки часу базою даних *MySQL* у програмі *SCADA*. Дані запрограмовані як архівні, і їх графіка дає можливість зробити ретроспективний аналіз. За аналізатором можна легко спостерігати за змінами у системі, використовуючи графіки. Попередження додані в програму *SCADA*, щоб дати змогу повідомити користувача про можливі помилки в системі.

## Реалізація й експериментальні результати

Установлену систему *TEG-DA-TS* наведено на рис. 7. Графіки потужності, струму й напруги за результатами випробувань, отриманих від програми *SCADA*, наведено на рис. 8, де використаний

тільки один модуль Алтек за різних градієнтів температури. Джерелами даних для кривих служать дані, збережені в базі даних MySQL для аналізу. На рис. 8 максимальним струмом є  $I_{SC}$ , коли значення опору навантаження  $R_L$  дорівнює нулю, а максимальною напругою є  $V_{max}$ , коли значення опору навантаження  $R_L$  нескінченне.



а)

б)

Рис. 7. Установлена система TEG-PAS.

- 1 – персональний комп'ютер, 2 – екран SCADA, 3 – програмувальний логічний контролер,  
4 – модуль розширення термопари EM231, 5 – перетворювач напруги,  
6 – перетворювач струму, 7 – джерело живлення, 8 – панель оператора,  
9 – комунікаційний кабель «програмувальний логічний контролер – панель оператора»  
10 – комунікаційний кабель «програмувальний логічний контролер – персональний комп'ютер»

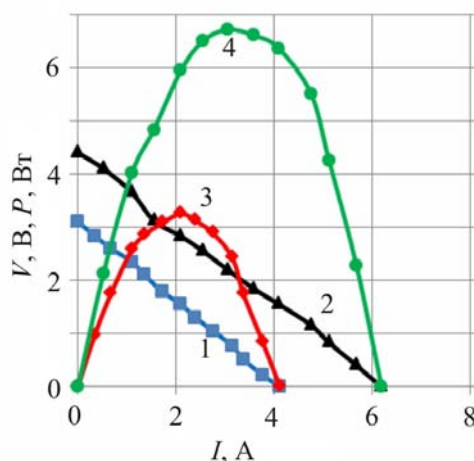


Рис. 8. Криві струму, напруги й потужності, що включають дані, отримані від SCADA за різних градієнтів температури  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

- (1 – напруга (V) при  $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$ , 2 – напруга (V) при  $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$ ,  
3 – потужність (P) при  $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$ , 4 – потужність (P) при  $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$ )

Генерована максимальна потужність  $P_{max}$  і отриманий максимальний ККД  $\eta_{max}$  у специфікаціях Алтек становлять 1 – 7 Вт і 3.5% за різниці температур  $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$  відповідно. У процесі експерименту найвище значення потужності було отримано за опору навантаження  $R_L = 0.72$  Ом і становило 6.71 Вт. У цьому випадку вхідна потужність  $Q_H = 197$ Вт, а ККД ТЕГ становило  $\eta_{max} = 3.4\%$ . Коли різниця температур між поверхнями ТЕГ дорівнює  $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$ ,

генерована максимальна потужність і отриманий максимальний струм зменшується, а генерована потужність знижується.

Криві струму, напруги, потужності, отримані на основі даних, зареєстрованих і переданих від TEG-DA-TS у програму SCADA, подано на рис. 9 як функцію різниці температур. Різниця температур ТЕГ збільшилася від  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  приблизно до  $\Delta T = 85^\circ\text{C}$ . Під час експерименту значення опору навантаження зберігалося постійним  $R_L = 2$  Ом. Значення струму становить  $I = 0.19\text{A}$  при  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ , тоді як за  $\Delta T = 85^\circ\text{C}$  воно дорівнює  $I = 1.75\text{A}$ , отже, зросло лінійно. А також, якщо значення напруги дорівнює  $V = 0.45\text{V}$  за  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ , то за  $\Delta T = 85^\circ\text{C}$  воно становить  $V = 4.35\text{V}$ , отже, зросло лінійно. Однак значення потужності дорівнює  $P = 0.09\text{W}$  за  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ , тоді як за  $\Delta T = 85^\circ\text{C}$  воно становить  $P = 7.58\text{W}$ , отже, зросло нелінійно.

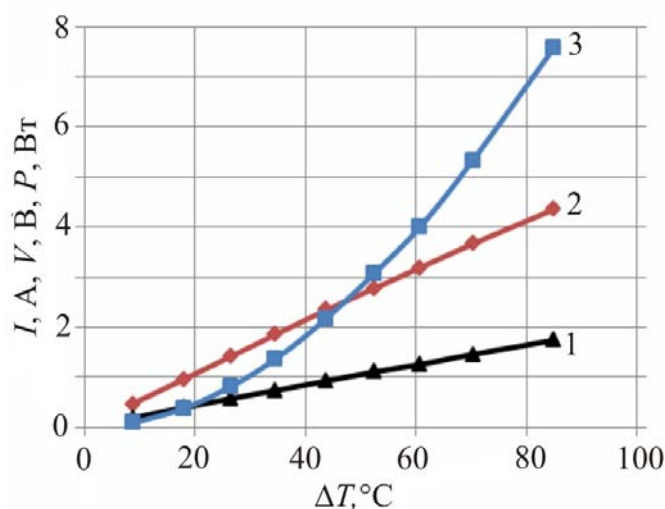


Рис. 9. Криві струму, напруги й потужності за різних градієнтів температури, отримані від SCADA. (1 – сила струму (I), 2 – напруга (V), 3 – потужність (P)).

## Висновки

Систему TEG-DA-TS спроектовано для розрахунків характеристик ТЕГ залежно від даних, отриманих від ТЕГ, і використано на попередньо встановленій системі ТЕГ 10 Вт. Програму SCADA написано для контролю й запису вимірюваних параметрів ТЕГ через персональний комп'ютер таких, як температури гарячої й холодної сторін, витрата гарячої й холодної води, значення струму, напруги й потужності. Програму панелі оператора, що з'єднана із програмувальним логічним інтерфейсом, написано й реалізовано для миттєвого контролю даних незалежно від персонального комп'ютера. Систему циркуляції гарячої й холодної води встановлена для проведення лабораторних експериментів з ТЕГ. ТЕ генератори Алтек-GM-1 досліджено із застосуванням системи TEG-DA-TS і визначено значення максимальної потужності  $P_{max}$  та ККД. Порівняння отриманих результатів зі специфікаціями ТЕГ показало, що відносна похибка максимальної потужності становила близько 4 %, а значення ККД було нижчим 3 % із TEG-DA-TS.

У перспективному дослідженні розроблена система TEG-DA-TS буде застосовуватися з потужнішими системами ТЕГ, наприклад, 100 Вт, 1.5 кВт.

## Подяка.

Це дослідження виконано за підтримки Управління суспільної дипломатії НАТО в рамках «Науки для миру» (NATO.NUKR.SFPP 984536).

## **Література**

1. Ahiska R., Mamur H., Ulis M., Modeling and Experimental Study of Thermoelectric Module as Generator, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. – 2011 26, p.889-896.
2. Rowe D.M., Review Thermoelectric Waste Heat Recovery as a Renewable Energy Source, International Journal of Innovations in Energy Systems and Power. – 2006. – 1. – p.13-23.
3. Niu X., Yu J., Wang S., Experimental Study on Low-Temperature Waste Heat Thermoelectric Generator, Journal of Power Sources. – 2009. – 188. – p.621-626.
4. Ahiska R., Dislitas S., Computer Controlled Test System for Measuring the Parameters of the Real Thermoelectric Module, Energy Conversion and Management. – 2011. – 52. – p.27-36.
5. Gou X., Xiao H., Yang S., Modeling, Experimental Study and Optimization on Low-Temperature Waste Heat Thermoelectric Generator System, Applied Energy. – 2010. – 87. – p.3131-3136.
6. Lertsatitthanakorn C., Electrical Performance Analysis and Economic Evaluation of Combined Biomass Cook Stove Thermoelectric (BITE) Generator, Bioresource Technology. – 2007. – 98. – p.1670-1674.
7. Tsai H.L., Lin J.M., Model Building and Simulation of Thermoelectric Module using Matlab/Simulink, Journal of Electronic Materials. – 2009. – 39. – p. 2105-2111.
8. Gould C.A., Shammass N.Y.A., Grainger S., Taylor I., Comprehensive A Review of Thermoelectric Technology, Micro-Electrical and Power Generation Properties, in: 26th International Conference on Microelectronics. – 2008. – p. 329-332.
9. Eklund J.M., Spencer I., Zheng J., Mercy D., Elliot C., Marnoch I., Data Collection, Simulation and Design of a Waste Heat Energy Conversion System, in: 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference. – 2009. – p. 1-6.
10. Han H.S., Kim Y.H., Kim S.Y., Umd S., Hyuna J.M., Performance Measurement and Analysis of a Thermoelectric Power Generator, in: 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. – 2010. – p. 1-7.
11. Kim K.J., Thermal and Power Generating Performances of Thermoelectric Energy Recovery Modules, in: 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. – 2010. – p. 1-7.
12. Hasebe M., Kamikawa Y., Meiarashi S., Thermoelectric Generators Using Solar Thermal Energy in Heated Road Pavement, in: 25th International Conference on Thermoelectrics. – 2006. – p. 697-700.
13. Singh R., Tundee S., Akbarzadeh A., Electric Power Generation from Solar Pond Using Combined Thermosyphon and Thermoelectric Modules, Solar Energy. – 2011. – 85. – p. 371-378.
14. Champier D., Bedecarrats J.P., Rivaletto M., Strub F., Thermoelectric Power Generation from Biomass Cook Stoves, Energy. – 2010. – 35. – p. 935-942.
15. Kucukkomurler A., Thermoelectric Powered High Temperature Wireless Sensing and Telemetry, in: 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – 2009. – p. 1080-1086.
16. Zhou Y., Paul S., Bhunia S., Harvesting Wasted Heat in a Microprocessor Using Thermoelectric Generators: Modeling, Analysis and Measurement, in: Design, Automation and Test in Europe. – 2008. – p. 98-103.
17. Rinalde G.F., Juanico L.E., Tagliavere E., Gortari S., Molina M.G., Development of Thermoelectric Generators for Electrification of Isolated Rural Homes, International Journal of Hydrogen Energy. 2010. – 35. – p. 5818-5822.
18. Ramadass Y.K., Chandrakasan A.P., Battery-Less A Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuit with 35 mV Startup Voltage, IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2011. – 46. – p. 333-341.

Надійшла до редакції 12.12.2014