

УДК 539.2:621.315.548.0:612.029.62

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2021-18-11

¹Криницький О.С., ²Маковишин В.І., ¹Біліщук В.Б.¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу²Івано-Франківський національний медичний університет

РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

В роботі представлено огляд методів і засобів вимірювання параметрів, які характеризують ефективність роботи термоелектричних генераторів. Двома найважливішими параметрами для оцінки ефективності роботи термоелектричних генераторів є ефективність перетворення та термоелектрична добротність. Попри нібито простоту методів вимірювання цих параметрів, їх практична реалізація пов'язана із значними труднощами, це призводить до утруднення оцінювання параметрів термоелектричних генераторів. В роботі запропонований простий, на думку автора, метод для оцінювання параметрів термоелектричних генераторів.

Ключові слова: термоелектричний генератор, електропровідність, термоелектрична добротність.

Вступ та постановка проблеми. Термоелектричні явища ґрунтуються на перетворенні теплової енергії в електричну і навпаки. При роботі в якості генератора пристрої називаються термоелектричними генераторами (ТЕГ). При роботі в режимі охолодження або нагрівання вони називаються термоелектричними охолоджувачами (ТЕО). Термоелектричні пристрої є твердотільними і здатні працювати без будь-яких проміжних рідин. Вони не мають рухомих частин, що знижує їх сприйнятливості до механічного руйнування під час довготривалого періоду роботи. Крім того, таке використання термоелектричних пристроїв дозволяє так звану «тиху роботу» з охолодження в порівнянні зі звичайними компресорними холодильними системами. Ці критерії роблять термоелектричні пристрої вельми привабливими для безлічі застосувань.

Для вироблення енергії термоелектричні пристрої використовуються в автомобілях в якості пристроїв рекуперації тепла вихлопних газів, де продувається тепла енергія вихлопних газів уздовж лінії вихлопу транспортного засобу і перетворюється в корисну електроенергію. Також їх використовують для дослідження космосу, для перетворення теплової енергії, що виділяється при розпаді радіоактивних ізотопів в електрику, сонячні термоелектричні станції захоплюють вхідне сонячне випромінювання і перетворюють сонячну теплову енергію в електричну.

Через їх здатність бути мініатюрними термоелектричні пристрої є придатними для регулювання температури обладнання, таких як хірургічні інструменти і волоконно-оптичні лазери в телекомунікаційних пристроях, також вони можуть бути вбудовані в мікропроцесори, щоб досягти точного контролю температури.

Але розробники обладнання часто стикаються з труднощами нестандартних форм даних про продуктивність, які надаються виробниками термоелектричних модулів. За винятком експериментальних засобів, єдиним методом оцінки продуктивності термоелектричних елементів є аналітичний аналіз і моделювання з використанням властивостей напівпровідникового матеріалу, що використали при виготовленні елементів, які, зазвичай, не розкриваються і є в повній мірі невідомі. У даній статті ми спробуємо запропонувати пристрій для перевірки і оцінки характеристик термоелектричних модулів експериментальним шляхом.

Аналіз існуючих методів оцінювання параметрів термоелектричних модулів. Як правило, розробники віддають перевагу простим методам оцінки ефективності, оскільки вони легко можуть бути відтворені споживачами термоелектричних перетворювачів. Експериментальні дослідження оцінюють якість продукту виробника шляхом порівняння експериментальних результатів з результатами, які надаються виробником. Ці випробування проводяться в різних умовах експлуатації, так як невідомо, яка перевірка проводиться виробниками, типовим прикладом може бути, чи відбувалася вона у вакуумному середовищі, чи ні, адже таке середовище дозволить провести більш точні вимірювання теплопередачі.

Д'Анжело і Хоган розробили процедуру випробування для визначення характеристик ТЕГ модуля, яка тривала неперервно впродовж 1 місяця [1]. Їх випробувальний стенд включає в себе вакуумний ковпак і джерело постійного тепла, виготовленого з нікель-хромового дроту, розміщеного на гарячій стороні модуля (рис. 1). Отримана ними крива продуктивності ТЕГ добре узгоджувалася з даними від виробника. Це дослідження доводить необхідність вакуумного середовища, щоб звести до мінімуму конвекційні втрати навколо випробувального пристрою, які могли б вплинути на результати вимірювань.

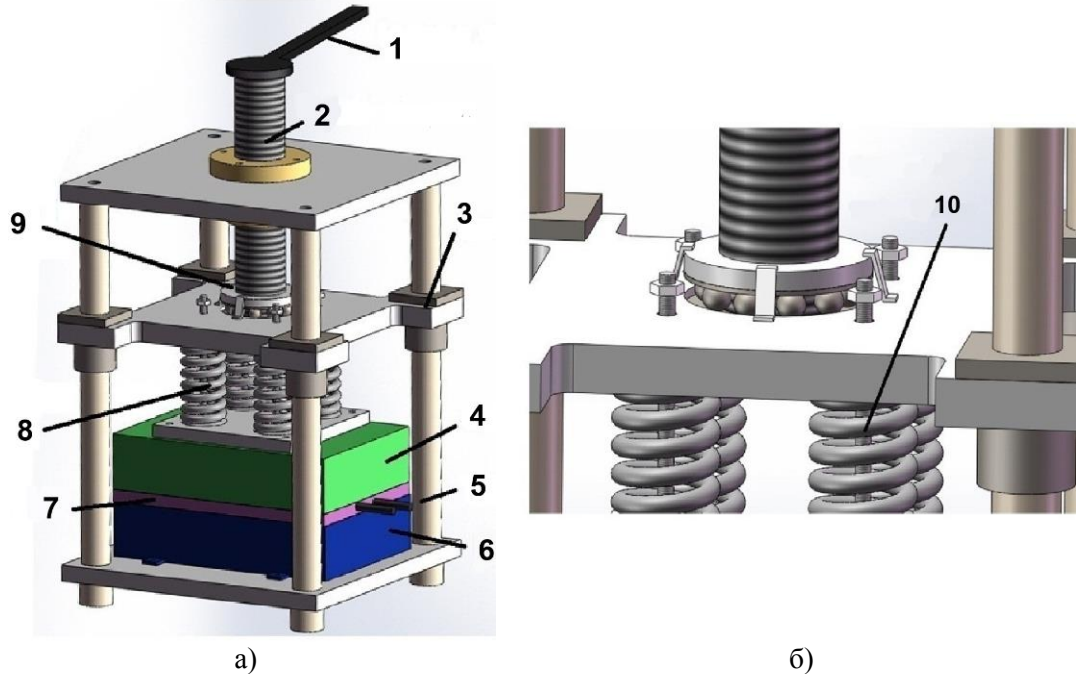


Рис. 1. Механічна конструкція установки для визначення характеристик ТЕГ модуля: (а) загальний вигляд (б) детальний вигляд блоку стиснення [1]

1- гайковий ключ; 2- болт подачі; 3- лінійний підшипник; 4- холодна сторона; 5- виходи ТЕГ; 6- гаряча сторона; 7-ізолятор; 8- пружина; 9- упорний підшипник; 10- пружина і направляючі болти

Васкес і ін. розробили випробувальний стенд для вимірювання продуктивності комерційно виготовлених модулів ТЕГ [2]. В їх конструкції застосовувалося поєднання тестового модуля з основним нагрівальним блоком і блоком водяного охолоджувача. Основний блок був джерелом тепла і був ізольований, щоб запобігти тепловтратам в навколишнє середовище. Вони використали два режими роботи. Перший - це зміна температури гарячої сторони, в той час як температура холодної сторони підтримувалася сталою. Другий режим роботи - підтримувалася сталою температура холодного блоку, в той час як вхідна потужність до основного блоку була різною. Їх результати узгоджуються з даними, наданими виробником.

Раушер і ін. провели випробування на ефективність ТЕГ модулів [3] [4] за наступною методикою: тестовий зразок був затиснутий між блоком нагрівача і блоком охолодження (рис. 2). Оскільки ефективність ТЕГ визначається відношенням вихідної потужності до швидкості передачі вхідного тепла, ними було виконано всього два вимірювання. Вихідну потужність ТЕГ легко виміряти за допомогою електронних навантажень, які забезпечують змінний опір навантаження. Що стосується швидкості передачі тепла, щоб уникнути проведення складного вимірювання теплопередачі, то її визначення проводили суто з електричних вимірювань, нехтували тепловтратами в навколишнє середовище і робили припущення що вся надана електрична потужність нагрівачу передавалася вимірювальному зразку. Для виконання припущення про низькі тепловтрати від нагрівального блоку було використано додатковий нагрівач, який компенсував втрати в навколишнє середовище. Керування нагрівачами здійснювалося за допомогою пропорційно-інтегрального контролера, так щоб температура додаткового нагрівача була рівною температурі нагрівального блоку в межах $\pm 0,02$ К. Коли обидва нагрівачі знаходилися в тепловій рівновазі, висувалося припущення, що втрати тепла будуть мінімальні і все тепло, котре йде від нагрівального блоку, поглинається лише ТЕГ. Опорна сталева кулька яка знаходиться на вершині нагрівача використовується для створення

термічно відокремленої опори, від механізму притискання, який дозволяє надійно притиснути ТЕГ модуль. Вимірювання можна проводити в атмосфері інертних газів або у вакуумі. Однак результати дослідження, не були порівняні з даними від виробників ТЕГ.

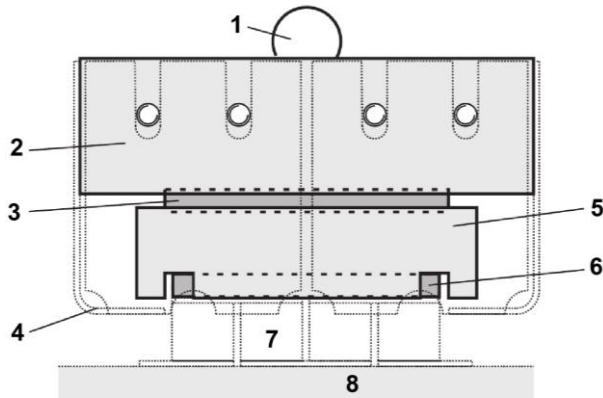


Рис. 2. Установка для визначення характеристик ТЕГ [4].

1 - нагрівач з опорною сталеву кулькою, 2 - мідний блок, 3 - додатковий нагрівач, 4 - екран від теплового випромінювання, 5 - ізоляційний блок, 6 - вимірювач температури, 7 - термоелектричний модуль, 8 - холодний бік модуля.

Аналогічний метод використання додаткових нагрівачів використали Анатичук і Гаврилюк [5]. Їхня установка (рис. 3) містила вимірювач кількості тепла між холодною стороною зразка і холодним радіатором. У ході своїх експериментів вони зрозуміли, що вихідна потужність нагрівача на гарячій стороні може бути визначена через співвідношення з потоком тепла через вимірювач кількості тепла на протилежному кінці модуля. Таким чином, вони зробили калібрування показників теплового вимірювача до вхідної потужності нагрівача для більш швидкої оцінки. Однак даний метод був достатньо громіздким, тому що багато паразитних втрат тепла доводилося або враховувати, або запобігати їх виникненню.

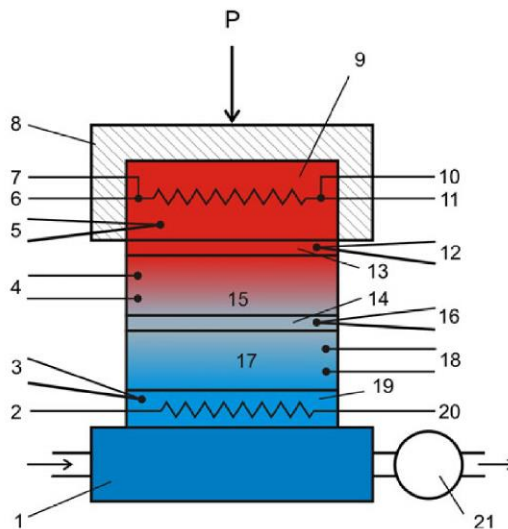


Рис. 3. Схема пристрою для вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів [5].

1 - холодний теплообмінник; 2,20 - дроти нагрівача холодного теплообмінника; 3 - термопара холодного теплообмінника; 4 - дроти модуля генератора; 5 - термопара гарячого теплообмінника; 6,11 - струмові провідники нагрівача теплообмінника; 7,10 - дроти потенціалу нагрівача гарячого теплообмінника; 8 - гарячий теплообмінник; 9 - нагрівач гарячого теплообмінника; 12 - вимірювальна термопара з боку гарячого модуля; 13, 14 - плити для вирівнювання тепла; 15 - модуль генератора; 16 - вимірювальна термопара з боку холодного модуля; 17 - вимірювач кількості тепла; 18 - дроти до вимірювача кількості тепла; 19 - нагрівач холодного теплообмінника, 21 - клапан охолоджуючої рідини з електричним управлінням.

Такава і ін. обчислювали ефективності ТЕГ з великими перепадами температур на протилежних сторонах модуля до 500 К [6]. Подібно як і в Анатичука і Гаврилюка [5], швидкість передачі тепла від гарячої сторони була виміряна безпосередньо за допомогою

вимірювача кількості тепла між холодною стороною зразка і холодним радіатором. Тепловий потік вимірювали на основі градієнта температури, що утворюється в мідному блоці з високою теплопровідністю, блок калібрували з використанням еталонного матеріалу. Еталонний матеріал вирізали у відповідну форму, а потім безпосередньо з'єднали з мідним блоком. Теплопровідність мідного блоку визначали вимірюванням різниці температур, що утворюється в еталонному блоці та мідному блоці під час подачі теплового потоку (рис. 4, а). Мідний блок постійно підтримується при температурі 300 К під час експерименту. Випробувальний пристрій було поміщено у вакуумі для зниження теплопровідності повітря ($<10^{-3}$ Па), так як теплопровідність повітря різко знижується приблизно при 10^{-1} Па. Електричну потужність, вироблену модулем, вимірювали за допомогою електронного навантаження. Навколо нагрівача та термоелектричного модуля був розміщений охолоджуваний водою радіаційний екран для запобігання нагріванню опори колони та вакуумної камери (рис 4, б). Нагрівання цих компонентів генерує додаткове тепло, випромінювання яких впливає на мідний блок і, таким чином, призводить до помилок у вимірі теплового потоку. Проте, незважаючи на те, що було використано радіаційний захист, не всі втрати на випромінювання були попереджені при екстремальних температурах.

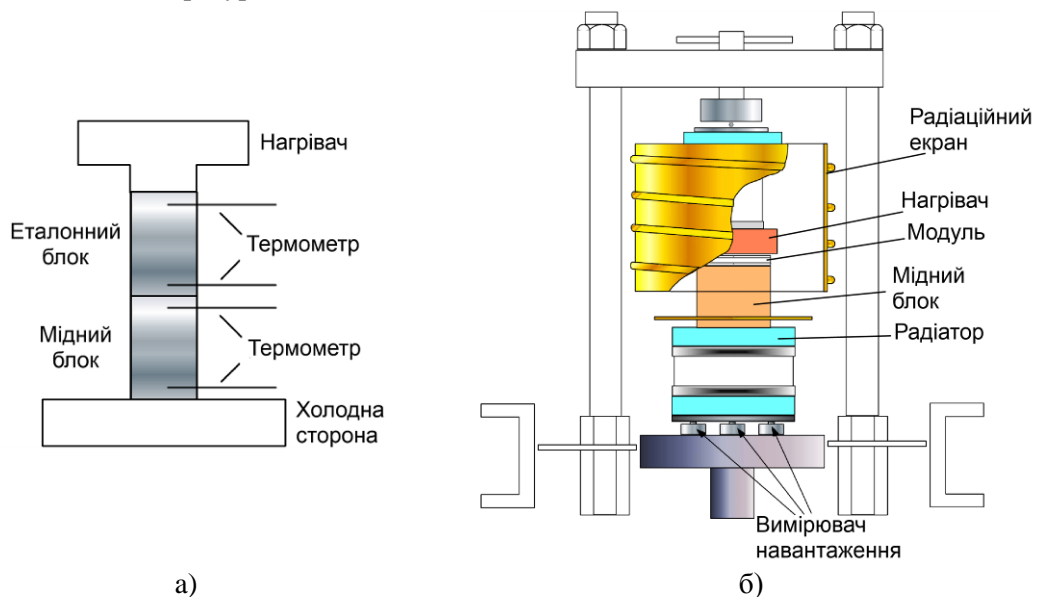


Рис. 4. Схема, яка використовується для калібрування вимірювача кількості тепла (а) і вигляд вимірювальної системи [6].

Сандоз-Розсадо і Стівенс розробили випробувальний стенд, щоб визначити продуктивність модулів ТЕГ [7]. Вони показали, що швидкість передачі тепла була найскладнішою для вимірювання. Вони аналітично розрахували продуктивність модулів ТЕГ за відомими характеристиками властивостей матеріалів, які були надані виробниками модулів. Їх аналітична модель враховувала паразитні втрати, які мали місце в керамічних пластинах. Порівнюючи свої аналітичні та експериментальні результати з продуктивністю, що надається виробниками, був зроблений висновок про те, що представлені властивості матеріалу були неточними.

Чен і Віліамс провели експериментальне дослідження швидкості передачі тепла і ефективності термоелектричних систем охолодження [8]. Їх аналітичний підхід розроблений на основі ідеальних термоелектричних рівнянь і вони розглядають два підходи щодо визначення термоелектричних властивостей матеріалу: 1 – властивості, залежні від температури, 2 – властивості не залежні від температури. Поряд з цими значеннями, Чен і Віліамс також оцінювали властивості матеріалу при середній робочій температурі і їх результати показали, що будь-який підхід має похибку, меншу 10%.

Крафтмайкер провів ряд простих експериментів з термоелектричним модулем для його роботи в якості нагрівача, охолоджувача і генератора енергії [9]. Блоки нагрівання і охолодження були використані для створення необхідної температури. При роботі ТЕГ в режимі генерування електроенергії швидкість передачі тепла на гарячу керамічну пластинку була точно обчислена шляхом встановлення і підтримки холодної сторони при 0°C і,

регулюючи нагрів на гарячій стороні, поки температура не була рівна температурі навколишнього середовища. У такому випадку тепло від нагрівача не витрачається в навколишнє середовище, а поглинається повністю модулем. При роботі в якості охолоджувача гаряча сторона підтримувалася при температурі навколишнього середовища, в той час як нагрівач на холодній стороні встановлювали таким чином, щоб різниця температур через модуль була відсутня ($T_2 = T_x$). Описані експерименти показують прості способи визначення величин, важливих для теорії термоелектричних пристроїв. Щоб виключити вплив теплообміну на навколишнє середовище, вимірювання проводяться в умовах, коли температура верхньої сторони модуля близька до кімнатної.

Фарджі і Акбарзаде розроблений компактний випробувальний стенд, щоб оцінити продуктивність модулів ТЕГ [10]. В якості джерела тепла був використаний блок нагрівача, в той час як температура на холодній стороні модуля підтримувалася за допомогою водяного охолодження. Для мінімізації розмірів системи охолодження в якості охолоджувача для циркулюючої рідини було використано модуль ТЕО. Модуль розміщували між холодними та гарячими блоками за допомогою термопасти і стискали із силою 500 кПа. Температура гарячої та холодної сторін встановлювали на рівні 150°C, 50°C відповідно, після очікування 1 год, щоб досягти стійкого стану рівноваги температур здійснювався запис вихідної напруги та струму. Для вимірювання струму використовувалися навантаження опором від 20 Ом і поступово зменшувалося до 1 Ом. Значення опору навантаження, при якому була досягнута максимальна вихідна потужність, було визначено як внутрішній опір модуля. Їх результативні експериментальні криві близькі до даних, представлених виробником. У своєму дослідженні вони наголосили на важливості надання достатньої сили притиску між ТЕГ і блоками нагріву і охолодження; збільшення сили стиснення, призводило до зниження опору контакту і поліпшувало вихідну потужність до певної межі. Дослідження достатньої притискної сили для зменшення опору контактів було також підтримано Монтекко і співав. [11] [12].

Хсу і ін. провели дослідження, які були зосереджені на вимірюванні термо-ЕРС модуля, шляхом визначення того, що вони назвали «ефективний коефіцієнт Зеебека» [13]. Їх результати коефіцієнта Зеебека показали різницю близько 30% в порівнянні із значеннями, наданими виробниками, і вони приписують ці розбіжності двом ефектам: 1 - збільшення теплового опору між контактами модуля при низьких силах притискування, 2 - неточні покази термопар, поміщених на керамічних пластинах модуля під час роботи. Ці температури були неточні через теплові контактні опори і, таким чином, вони побудували детальні теплові залежності опору для визначення різниці температур і точного визначення температури сторін. Вони припустили, що за рахунок використання концепції «ефективного коефіцієнта Зеебека» аналітичні обчислення були більш точні.

Метод Хармана є спрощеним, але точним методом вимірювання безрозмірної термоелектричної добротності ZT , який широко застосовується в термоелектриці [14]. Цей метод вперше був запропонований Т. С. Харманом в 1958 році для оцінювання добротності термоелектричних матеріалів, і цей метод був названий на його честь. Методика вимірювання ґрунтується на вимірюванні напруги холостого ходу U_α і спаду напруги на модулі, коли струм проходить через зразок. Якщо не враховувати Джоулевий нагрів і ефект Томпсона, Харман запропонував:

$$ZT = \frac{U_\alpha}{IR} \quad (1)$$

Слід звернути увагу, що при використанні методу необхідно помістити тестовий зразок у вакуумне середовище, а джерело струму для вимірювання падіння напруги має бути досить мале, щоб створити ефект Пельтье і викликати різницю температур в зразку, але досить великої сили, щоб викликати істотний Джоулевий нагрів [15]. Так як показник термоелектричної добротності є основним показником якості для термоелектричних матеріалів, його значення має широкий інтерес для розробників.

Лау вивчав вплив різних рівнів вакууму на тестовому зразку, коли був застосований метод Хармана для визначення ZT [16]. Проте, результати не враховують всі невизначеності при різних рівнях тиску у вакуумній смності.

Мін і Рове запропонував модифікацію методу Хармана при визначенні ZT [17]. Даний метод економить час, але його точність близько 20% і є істотно гіршою, ніж отриманий при вимірюванні електричних та теплових властивостей окремо (~ 10% у цьому випадку). У своїй

публікації вони показали, що шляхом вимірювання різниці температур при короткому замиканні ΔT_k і при розімкненому колі ΔT_0 можна визначити безрозмірний показник добротності за виразом:

$$ZT = \frac{\Delta T_k}{\Delta T_0} - 1 \quad (2)$$

Перевага даного методу в порівнянні з початковим методом Хармана є те, що даний метод вимагає тільки стійкого стану, а не адіабатних умов, як в методі Хармана.

Крім того, коли виходи ТЕГ не замкнені, а підключені до навантаження з опором R_n , рівняння (2) можна виразити як:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_R} = 1 + ZT \left[\left(\frac{R}{R + R_n} \right) \left(\frac{2T_2}{T_2 + T_x} \right) - \left(\frac{R}{R + R_n} \right)^2 \left(\frac{T_2 - T_x}{T_2 + T_x} \right) \right] \quad (3)$$

Рівняння (3) дозволяє проводити вимірювання за будь-якого струму через вибір опору навантаження R_n , тоді як вимірювання, зроблені на основі рівняння (2), проводяться за певного струму, тобто лише струму короткого замикання. В принципі, ZT , визначений через $\alpha^2 \sigma T / \chi$, не залежить від вимірювального струму. Однак на практиці оцінка ZT для сегментованого термоелектричного матеріалу або з функціональним градієнтом може суттєво вплинути шляхом вимірювання різниці струму або температури в ньому через «внутрішній» ефект Пельтьє та ефект Томсона. Видно, що рівняння (3) надає практичну можливість оцінити реалістичне значення ZT сегментованих матеріалів та матеріалів з функціональними градієнтами, раніше це було важким завданням.

Реалізація методу вимірювання параметрів ТЕГ. Двома важливими параметрами для термоелектричних генераторів є ефективність перетворення η та термоелектрична добротність ZT . В даний час використовуються два методи вимірювання добротності ТЕГ: із застосуванням методу Хармана для безпосереднього вимірювання ZT або окреме вимірювання коефіцієнтів термо-ЕРС α , електропровідності σ , теплопровідності χ , звідки:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\chi} \quad (4)$$

Розроблюваний пристрій для кількісної оцінки важливих параметрів одного термоелектричного модуля з розмірами 40×40 мм і не має обмеження по його товщині, базується на методі Хармана. Принцип полягає у створенні регульованого теплового потоку через ТЕГ шляхом створення різниці температур у модулі, а потім вимірювання та контроль електричних та теплових параметрів. Вхідний тепловий потік створюється керамічним нагрівачем потужністю 100 Вт і напругою 24 В. Тепло проходить через ТЕГ, і частина його перетворюється в електричну енергію модулем ТЕГ, решта - за виключенням втрат тепла через сторони блоків - досягає холодного блоку.

В установці, яка схематично представлена на рис.5, нагрівання модуля 5 здійснюється за допомогою плоского керамічного нагрівника 3, який увімкнений у мережу постійного струму через терморегулятор, котрий забезпечує стабілізацію температури на модулі. Для вимірювання температури використано термопари типу ХК. Охолодження протилежної сторони модуля 5 здійснюється за допомогою радіатора 4 з активним охолодженням, або можливе використання порожнистої пластини із заповненням її водою для збільшення ефективності охолодження. Притискання модуля ТЕГ до радіатора і нагрівача реалізується за допомогою притискного механізму, який реалізований притискною планкою 1 і пружиною тарілчастого типу 2, також можлива реалізація виміру зусилля притискання шляхом виймання пружини і притискання модуля планкою і вибір зусилля динамометричним ключем. Для більшої повторюваності результатів експерименту, а також для зменшення тепловтрат вимірювальну комірку рекомендується помістити під вакуумний ковпак.

Методика вимірювання параметрів наступна: ТЕГ нагрівається до певної температури, після стабілізації температури очікують $\approx 5-15$ хв. для стабілізації теплових потоків в модулі. Після чого проводяться вимірювання температури гарячої і холодної сторін, напруги холостого ходу ТЕГ і струму, який може згенерувати модуль. Для створення навантаження для модуля ТЕГ використано електронне навантаження, побудоване за стандартною схемою на операційному підсилювачі і польовому транзисторі. Процес вимірювання повторюється для

кількох заданих температур. Для обчислення добротності модуля на нього короткочасно подається напруга і вимірюються спад напруги на модулі U_ρ , а також генерована ним напруга U_α . Маючи значення заданої температури T , можна розрахувати значення добротності модуля

$$ZT = \frac{U_\alpha}{U_\rho T}. \quad (5)$$

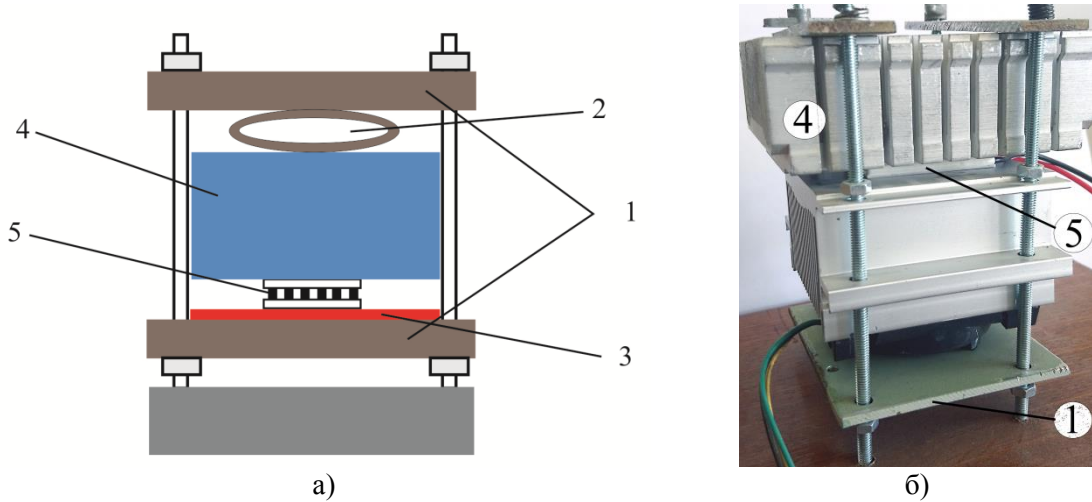


Рис. 5. Схематичний вигляд (а) реальний вигляд (б) установки для вимірювання термоелектричних параметрів

Ефективність перетворення η для ТЕГ можна визначити із рівняння:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_2} \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + T_x/T_2}. \quad (6)$$

Висновки:

В даній роботі було проведено аналіз відомих методів вимірювання параметрів термоелектричних генераторів. Розроблено пристрій, який дозволяє оцінювати і вимірювати такі параметри як термоелектрична добротність, напруга холостого ходу, максимальний вихідний струм генератора, внутрішній опір модуля.

Література

1. J. D'Angelo, T. Hogan, "Long term thermoelectric module testing system," Review of Scientific Instruments, vol. 80, pp. 1-3, October 2009.
2. J. Vazquez, R. Palcios, M. A. Sanz-Bobi, A. Arenas, "Test bench for measuring the electrical properties of commercial thermoelectric modules," in 22nd International Conference on Thermoelectrics, 2003, pp. 589-593.
3. L. Rauscher et al., "New approach for highly accurate efficiency determination of thermoelectric generator," in 22nd International Conference on Thermoelectrics, 2003, pp. 508-511.
4. L. Rauscher, S. Fujimoto, H. T. Kaibe, and S. Sano, "Efficiency determination and general characterization of thermoelectric generators using an absolute measurement of the heat flow," Measurement Science and Technology, vol. 16, pp. 1054-1060, March 2005.
5. L. I. Anatychukl, M. V. Havrylyuk, "Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules," Journal of Electronic Materials, vol. 40, no. 5, pp. 1292-1297, March 2011.
6. H. Takazawa et al., "Efficiency measurement of thermoelectric modules operating in the temperature difference of up to 550K," in 2006 International Conference on Thermoelectrics, 2006, pp. 189-192.
7. E. J. Sandoz-Rosado, R. J. Stevens, "Experimental characterization of thermoelectric modules and comparison with theoretical models for power generation," Journal of Electronic Materials, vol. 38, no. 7, pp. 1239-1244, 2009.
8. K. Chen, S. B. Gwilliam, "An analysis of the heat transfer rate and efficient of TE (thermoelectric) systems," International Journal of Energy Research, vol. 20, pp. 399-417, 1996.
9. Y. Kraftmakher, "Simple experiments with a thermoelectric module," European Journal of Physics, vol. 26, pp. 959-967, 2005.

10. A. Y. Faraji, A. Akbarzadeh, "Design of a compact, portable test system for thermoelectric power generator modules," *Journal of Electronic Materials*, vol. 42, no. 7, pp. 1535-1541, November 2013.

11. A. Montecucco, J. Buckle, J. Sivter, A. R. Knox, "A new test rig for accurate nonparametric measurement and characterization of thermoelectric generators," *Journal of Electronic Materials*, vol. 42, no. 7, pp. 1996-1973, 2013.

12. F. A. Leavitt, N. B. Elsner, J. C. Bass, "Use, application and testing of Hi-Z thermoelectric modules," Hi-Z Technology, Inc., San Diego, Product Testing Instructions.

13. C. Hsu, G. Huang, H. Chu, B. Yu, D. Yao, "An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 5173-5179, 2011.

14. T. C. Harman, "Special techniques for measurement of thermoelectric properties," *Journal of Applied Physics*, vol. 29, pp. 1373-1374, June 1958.

15. S. B. Mahajan, "Design of a compact, portable test system for thermoelectric power generator modules," Rochester Institute of Technology, Rochester, Master Thesis UMI Number: 1543212, 2013.

16. P. G. Lau, "Convection correction factor determination for use with the transient test method for thermoelectric modules," in 18th International Conference on Thermoelectrics, 1999, pp. 252-255.

17. G. Min, D. M. Rowe, "A novel principle allowing rapid and accurate measurement of a dimensionless thermoelectric figure of merit," *Measurement Science and Technology*, vol. 12, pp. 1261-1262, May 2001.

¹Krynytskyi O.S., ²Makovyshyn V.I., ¹Bilishchuk V.B.

1 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

2 Ivano-Frankivsk National Medical University

DEVELOPMENT DEVICE FOR EVALUATION PARAMETERS OF THERMOELECTRIC MODULES

The paper presents an overview of methods and means of measuring parameters that characterize the efficiency of thermoelectric generators. The two most important parameters for evaluating the efficiency of thermoelectric generators are the conversion efficiency and thermoelectric quality factor. Despite the alleged simplicity of methods for measuring these parameters, their practical implementation is associated with significant difficulties, which makes it difficult to estimate the parameters of thermoelectric generators. The paper proposes a simple, according to the author, method for estimating the parameters of thermoelectric generators.

Keywords: thermoelectric generator, electrical conductivity, thermoelectric quality factor

¹Криницкий А.С., ²Маковишин В.И., ¹Билищук В.Б.

1 Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

2 Ивано-Франковский национальный медицинский университет

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

В работе представлен обзор методов и средств измерения параметров, характеризующих эффективность работы термоэлектрических генераторов. Двумя важнейшими параметрами для оценки эффективности работы термоэлектрических генераторов является эффективность преобразования и термоэлектрическая добротность. Несмотря на кажущуюся простоту методов измерения этих параметров, их практическая реализация связана со значительными трудностями, это приводит к затруднению оценки параметров термоэлектрических генераторов. В работе предложен простой, по мнению автора, метод для оценки параметров термоэлектрических генераторов.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, электропроводность, термоэлектрическая добротность