

УДК: 372.853:004.94

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

Б.С. Дзундза¹, М.В. Штунь¹, С.В. Домбровський¹, З.М. Дашевський²

Подальший розвиток методів та автоматизація вимірювання параметрів термоелектричних напівпровідникових перетворювачів енергії

¹Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна,
bohadrn.dzundza@cnu.edu.ua;

²Університет Бен-Гуріона в Неgevі, Беер-Шева, Ізраїль, zdashev@bgu.ac.il

Розроблено концепцію та апаратно програмні засоби автоматизованого вимірювання термоелектричних параметрів напівпровідникових перетворювачів енергії. Система побудована на основі вдосконалених вакуумних методів прямих вимірювань з застосуванням сучасної елементної бази, високоточних аналого-цифрових перетворювачів, що у поєднанні з програмними методами обробки отриманих експериментальних даних дало можливість підвищити точність вимірювання. Розроблено прецизійний програмно керований стабілізатор струму, який дозволяє проводити вимірювання електричних характеристик термоелектричних перетворювачів енергії в широкому діапазоні навантажень від одиниць мікроампер до декількох ампер. Реалізована можливість автоматизованої діагностики та визначення експлуатаційних параметрів напівпровідникових термоелектричних модулів перетворення енергії, зокрема тонкопліткових, що дає можливість відбракувати дефектні модулі і в цілому значно підвищує надійність термоелектричних генераторів.

Проведено експериментальні дослідження серії генераторних термоелектричних зразків з відомими характеристиками та показано ефективність розроблених засобів із застосуванням описаних методик аналізу експериментальних даних.

Ключові слова: термоелектричні перетворювачі, чиста енергія, автоматизація, напівпровідникові структури, схемотехніка, мікропроцесор, комп'ютерне моделювання, 3D друк, 3D моделювання, цифро-аналоговий перетворювач.

Подано до редакції 10.11.2025; прийнято до друку 19.05.2026; опубліковано 22.06.2026.

Вступ

Термоелектричні матеріали є важливими, як для сучасної енергетики, так і для електроніки, оскільки дозволяють безпосередньо перетворювати теплову енергію в електричну, а також можуть працювати на охолодження. Це робить їх перспективними для побудови мініатюрних генераторів та охолоджувачів для сучасних систем електроніки, утилізації відпрацьованого тепла та створення автономних джерел живлення.

Ефективність термоелектричних матеріалів визначається безрозмірною величиною ZT:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T,$$

де S – коефіцієнт Зеебека, σ – питома електропровідність, κ – теплопровідність.

Точність визначення цих параметрів критично важлива для розробки нових матеріалів і підвищення їх ефективності. Це особливо актуально для тонкопліткових напівпровідникових матеріалів, які на даний час представляють значний науковий інтерес завдяки можливості незалежного підвищення коефіцієнту Зеебека (S) і зниження теплопровідності (κ) [1]. Такі дослідження вимагають точних вимірювань питомої електропровідності, коефіцієнту

Зеєбека, теплопровідності. Однак такі вимірювання є досить трудомісткими і ускладнюються впливом контактних опорів і теплових втрат, що потребує вдосконалення методів і розробки спеціалізованих установок. Також актуальною задачею є розробка засобів для автоматизованої діагностики термоелектричних модулів перетворення енергії.

I. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Сучасні досягнення в синтезі напівпровідникових матеріалів призвели до підвищення ефективності перетворення теплової енергії в електричну за рахунок розмірних ефектів та наноструктурування матеріалів, що значно розширило межі застосування термоелектричної енергії [2-4]. Найбільш поширеними є прямі методи термоелектричних вимірювань, зокрема, диференційний метод при якому вимірюється різниця напруги при заданому температурному градієнті. У роботі [5] представлена система для прямих досліджень термоелектричних характеристик диференціальним методом на основі плат розширення LabVIEW, прецизійного електрометра, з використанням хромель-алюмелевої термопари для вимірювання різниці температур створеної градієнтним нагрівником. Метод використовує термопари для визначення температури та застосовується у широкому діапазоні температур. Метод є простий у реалізації та забезпечує високу точність вимірювання при стабільних умовах, але чутливий до впливу паразитних термо-ЕРС та неточностей підтримування заданого градієнту температури. Також геометрія контактів суттєво впливає на точність вимірювань, особливо при високих температурах. Дані методи потребують градієнтного нагрівника і точного підтримування і вимірювання невеликого градієнту температури, та врахування теплових потоків і втрат, що може вносити значну похибку у оцінку термоелектричної добротності. Дані проблеми проектування приладів та аналізу експериментальних даних розглянуті в роботах [6-7], де показано що при похибці вимірювань основних термоелектричних параметрів яка не перевищувала 5% середня похибка вимірювання добротності була близько 20%.

Квазістаціонарні методи дають можливість зменшити похибки вимірювання шляхом плавної зміни температурного градієнта. Використовується у сучасних установках для одночасного вимірювання кількох параметрів. Наприклад, автоматизовані системи дозволяють визначати коефіцієнта Зеєбека і питомої електропровідності одночасно [8,9]. Обмеженням даної автоматизованої системи є вимірювання тільки двох основних параметрів, також незважаючи на суттєве зменшення похибки вимірювання вона все ще залишається суттєвою. Чотирьохзондовий метод широко застосовується для вимірювання електропровідності, оскільки усуває вплив контактного опору. У сучасних установках він поєднується з вимірюванням коефіцієнта Зеєбека для отримання комплексних характеристик матеріалу

[10].

Перспективними також є методи одночасного вимірювання декількох параметрів, зокрема, коефіцієнта Зеєбека, питомої електропровідності, теплопровідності та інших характеристик. Зокрема у роботі [11], розроблено високотемпературні установки, що дозволяють одночасно визначати кілька параметрів до 800°C. Щодо вимірювання теплопровідності то найпопулярнішими є стаціонарні методи, які базуються на вимірюванні теплового потоку через зразок при встановленому температурному градієнті. Але через значні тепловтрати такі методи важко застосовувати для тонкоплівкових зразків, де перевагу надають динамічним методам вимірювання, наприклад лазерному флеш методу [12-14]. Новітні методики дозволяють одночасно визначати теплопровідність разом із іншими параметрами, що підвищує ефективність досліджень.

При застосуванні існуючих засобів для вимірювання термоелектричних параметрів виникає багато труднощів, зокрема з адаптацією методик вимірювання до заданих конфігурацій зразків та інтеграцією таких засобів в уже існуючі лабораторні комплекси. Тому подальший розвиток методів та розробка спеціалізованих апаратно-програмних засобів дослідження та діагностики термоелектричних перетворювачів енергії, а також методики обробки, програмної фільтрації та апроксимації даних для визначення їх експлуатаційних характеристик залишається актуальною.

Метою роботи є подальший розвиток методів дослідження та розробка апаратно-програмних засобів для автоматизації вимірювання термоелектричних параметрів напівпровідникових перетворювачів енергії.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- розробка концепції та методики дослідження, а також конструкції вимірювальної комірки;
- проектування прецизійного програмно керованого стабілізатора струму та алгоритмів його роботи та розробка програмно-апаратних засобів вимірювання на основі прецизійних аналого-цифрових перетворювачів для автоматизованих досліджень термоелектричних властивостей перетворювачів енергії;
- провести дослідження термоелектричних матеріалів та оцінити ефективність розроблених засобів.

II. Подальший розвиток методики дослідження та конструкція вимірювальної комірки

На даний час основні зусилля науковців в галузі термоелектрики зосереджені на пошуку матеріалів з підвищеною термоелектричною ефективністю та розширенні діапазону робочих температур (50 – 600 °C). Основними параметрами, що визначають

якість термоелектричного матеріалу є питома електропровідність, коефіцієнт Зеебека, та теплопровідність, крім цього для термоелектричного перетворювача енергіє необхідна також інформація про внутрішній опір, генеровані струми, термоелектрична потужність, теплоємність та ін.

Для вимірювання всіх цих параметрів вибрано прямі методи при реалізації яких через термоелемент пропускають тепловий потік завдяки створеному між нагрівником і охолоджувачем певному градієнту температури. Дана робота є подальшим розвитком методики прямих вимірювань описаної у роботі [15], основною особливістю методики є використання двох однакових зразків які розміщені по обидві сторони від нагрівника і охолоджуються однаковими водяними радіаторами (рис. 1, б). Методику адаптовано для дослідження тонкоплівкових термоелектричних матеріалів, та модулів генерації енергії на їх основі. Тонкі плівки через проставки з тонкої слюди затискаються між мідним нагрівником та радіаторами які охолоджуються водою (рис. 1, в), що дало можливість підтримувати стабільною температуру холодних спайів. Можливе як дослідження окремо тонкоплівкових зразків так і закріплення двох зразків для реалізації порівняльних методів.

Для нагрівання невеликих зразків виготовлено мініатюрний мідний нагрівник малої потужності, а для зниження паразитних тепловтрат застосовано трубчастий танталовий тепловий екран. Зразки від нагрівника і радіаторів відділені тонкими нікелевими

пластинами які служать вимірювальними контактами, навантаження термоелементів здійснюється через нагрівник і радіатори, що дало можливість реалізувати чотирипровідну схему. Загальний вигляд вимірювальної комірки наведено на рис. 1.

Установка підтримує до 5 термопар, одна в нагрівнику, ще по одні в радіаторах, і дві можуть всвердловатися в зразок для додаткового контролю теплових потоків. Важливим вдосконаленням є застосування інтегральних перетворювачів сигналів термопар МСР9600 та АЦП, з розміщенням їх у вакуумній камері та обміном з центральним блоком через І2С інтерфейс, що дозволило значно скоротити довжину проводів чутливих до завад та наведень, та вимірювати температуру з точністю 0,05 °С.

Принцип визначення коефіцієнта теплопровідності стаціонарних методів описаний у роботі [15]. При реалізації порівняльних методів кількість теплоти, що пройшла через досліджуваний зразок, визначається з відомих параметрів еталонного зразка, що знаходиться в аналогічних умовах. Методи досить добре працюють для різних матеріалів у широкому інтервалі температур: від кількох градусів до 600 °С.

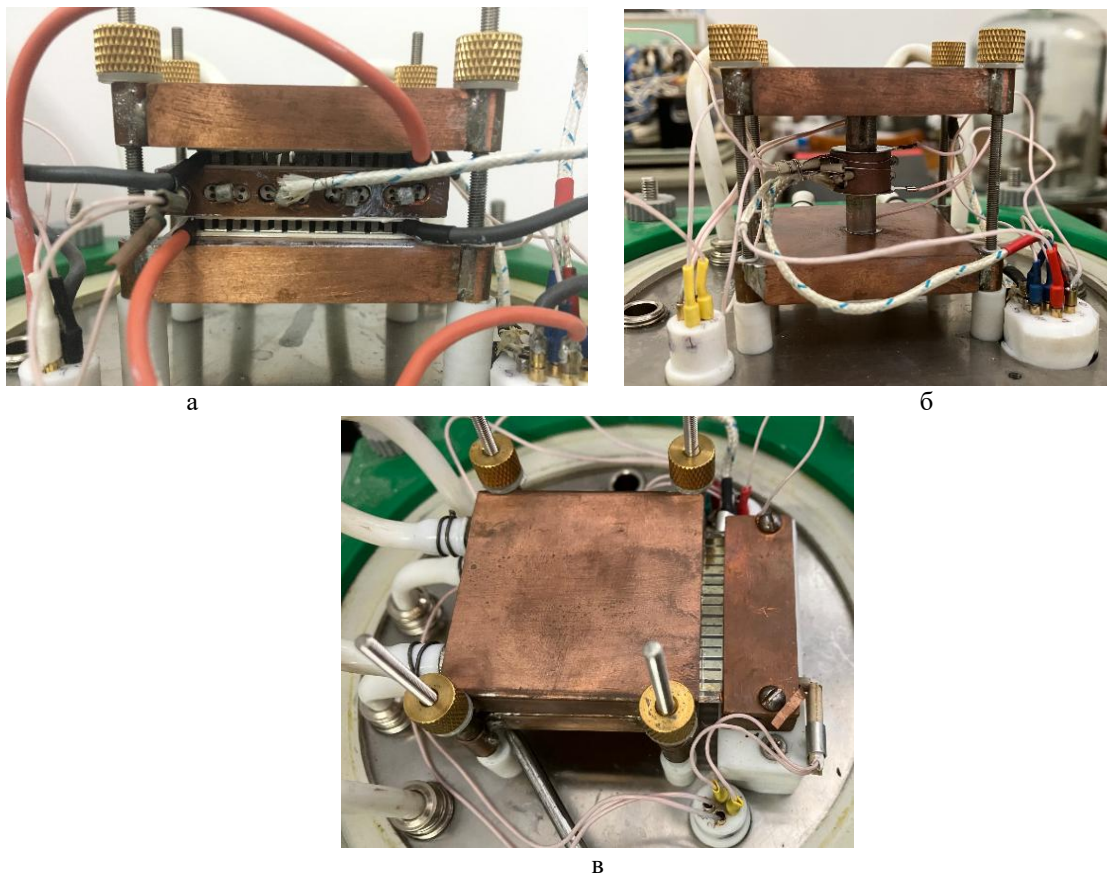


Рис. 1. Загальний вигляд вимірювальної комірки для дослідження термоелектричних генераторів (а), циліндричних або прямокутних термоелектричних зразків (б) та тонкоплівкових термоелектричних перетворювачів (в).

III. Концепція та програмно-апаратні засоби для автоматизованих досліджень термоелектричних властивостей

При розробці концепції вимірювальної системи особливу увагу приділялося універсальності рішень, що забезпечило можливість дослідження як масивних так і плівкових термоелементів, а також діагностику термоелектричних модулів, з врахуванням досвіду роботи на попередній установці, яка мала ряд обмежень [15]. Структурну схему спроектовано з можливістю автономної роботи з записом результатів на карту пам'яті, а також залишено можливість керування з комп'ютера для виконання нестандартних експериментів.

Основну ідею полягає в застосуванні для навантаження термоелемента алгоритму пошуку точки максимальної потужності (МППТ алгоритм). Щоб отримати максимальну потужність, зовнішнє навантаження має дорівнювати внутрішньому опору модуля при заданій температурі. Реалізовано два найпопулярніші алгоритми. Perturb and Observe - контролер трохи змінює струм і спостерігає за зміною потужності, якщо потужність зростає, він продовжує змінювати параметри в тому ж напрямку. Та більш точний Incremental Conductance – контролер аналізує похідну потужності за напругою (dP/dV), і знаходить точку, де $dP/dV = 0$.

Для апаратної реалізації можливості роботи МППТ алгоритмів застосовано програмно керований стабілізатор струму побудований на операційному підсилювачі та MOS-FET транзисторі. Струм стабілізації задається цифро-аналоговим перетворювачем, а для забезпечення широкого діапазону робочих струмів від одиниць мкА до декількох ампер реалізовано транзисторне перемикання шунта. Шунт використовується, як для

забезпечення роботи зворотного зв'язку стабілізатора струму так і для вимірювання струму аналого-цифровим перетворювачем мікроконтролера.

Структурна схема вимірювальної системи наведена на рис. 2.

Для забезпечення стабільної температури холодної сторони через два мідні радіатори пропускається холодна вода охолоджувана за допомогою холодильного термостата на основі елементів Пельтьє. Можливе також використання протічної водопровідної води. Задана температура гарячої сторони підтримується мікроконтролером за допомогою прецизійного PID терморегулятора, потужність якого точно вимірюється і може підтримуватися сталою, незалежно від зміни зовнішніх умов чи опору нагрівника.

В якості керуючого пристрою вибрано сучасний 32 розрядний мікроконтролер STM32G474, який призначений для точних вимірювальних цілей, керуюча програма для мікроконтролера написана на C.

Для вимірювання згенерований напруги застосовано високоточні 18 розрядні аналого-цифрові перетворювачі MCP3421 з вбудованим керуванням підсилювачем, які розміщено у вимірювальній камері, що значно зменшило рівень шумів та підвищило точність вимірювання. Також вимірювання можна проводити за допомогою інтегрованого у вимірювальну установку повіреного промислового цифрового мультиметра UNI-T UTM1805A який підтримує вивід даних на комп'ютер і в режимі вольтметра постійної напруги забезпечує роздільну здатність 1 мкВ при точності 0,015% та має режим автоматичного вибору діапазону вимірювання.

Зв'язок з комп'ютером на апаратному рівні забезпечується апаратною підтримкою USB мікроконтролера, а на програмному за допомогою інтерпретатора текстових команд.

Для визначення термоелектричної потужності та

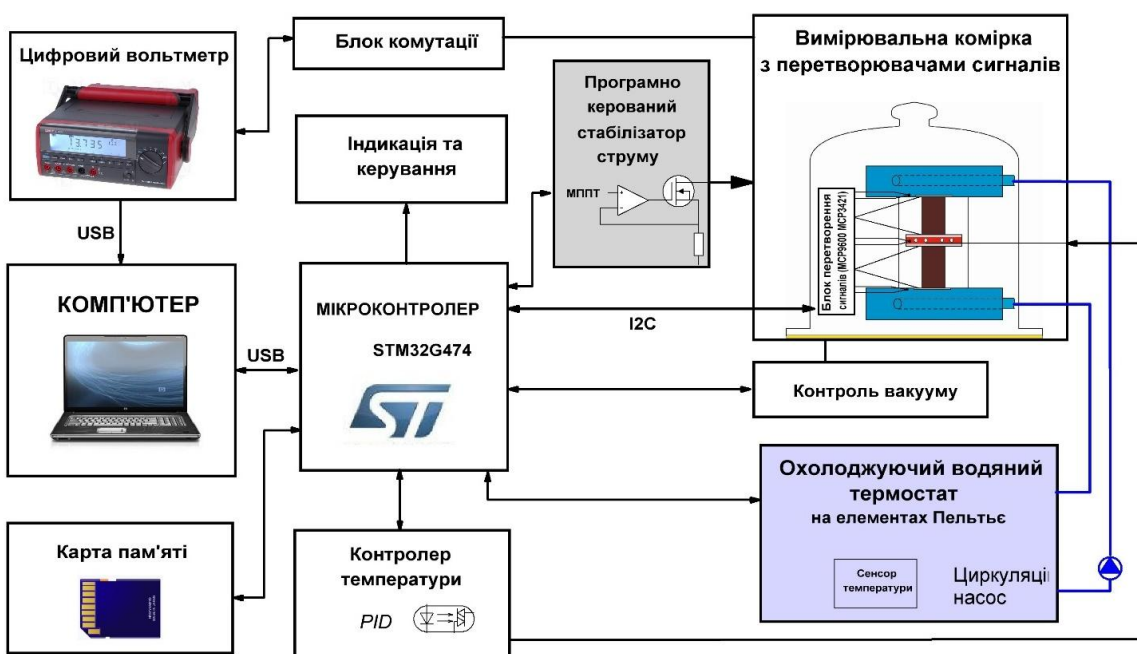


Рис. 2. Структурна схема системи для автоматизованого дослідження термоелектричних властивостей.

внутрішнього опору реалізовано стабілізований блок навантаження, побудований на основі програмно керованого стабілізатора струму який реалізовано на операційному підсилювачі (рис. 3). Дослідження впливу ефекту Пельте при навантаженні дає додаткові можливості для вивчення параметрів переносу тепла, зокрема визначення теплопровідності.

Реалізована чотирипровідна схема вимірювання, з можливістю зміни полярності на реле. Живлення від мережі через трансформатор, нагрівник живиться від окремих обмоток з можливістю їх переключення, що дає додаткові можливості регулювання. Потужність регулюється симістором за допомогою ПІД алгоритму з

переключенням в момент переходу через нуль та розподілом періодів за алгоритмом Брезенхема.

Проведено 3D моделювання компоновки елементів в корпусі враховуючи їх взаємні впливи. Електронна частина установки зібрана у компактному корпусі, плати розміщені з урахуванням мінімізації взаємних наведень, з'єднання виконано екранованим проводом, корпус заземлено (рис. 4.)

Програма дає можливість проводити експеримент в автономному режимі, за наперед заданими сценаріями, з записом результатів на SD карту. При підключенні до комп'ютера можливе виконання

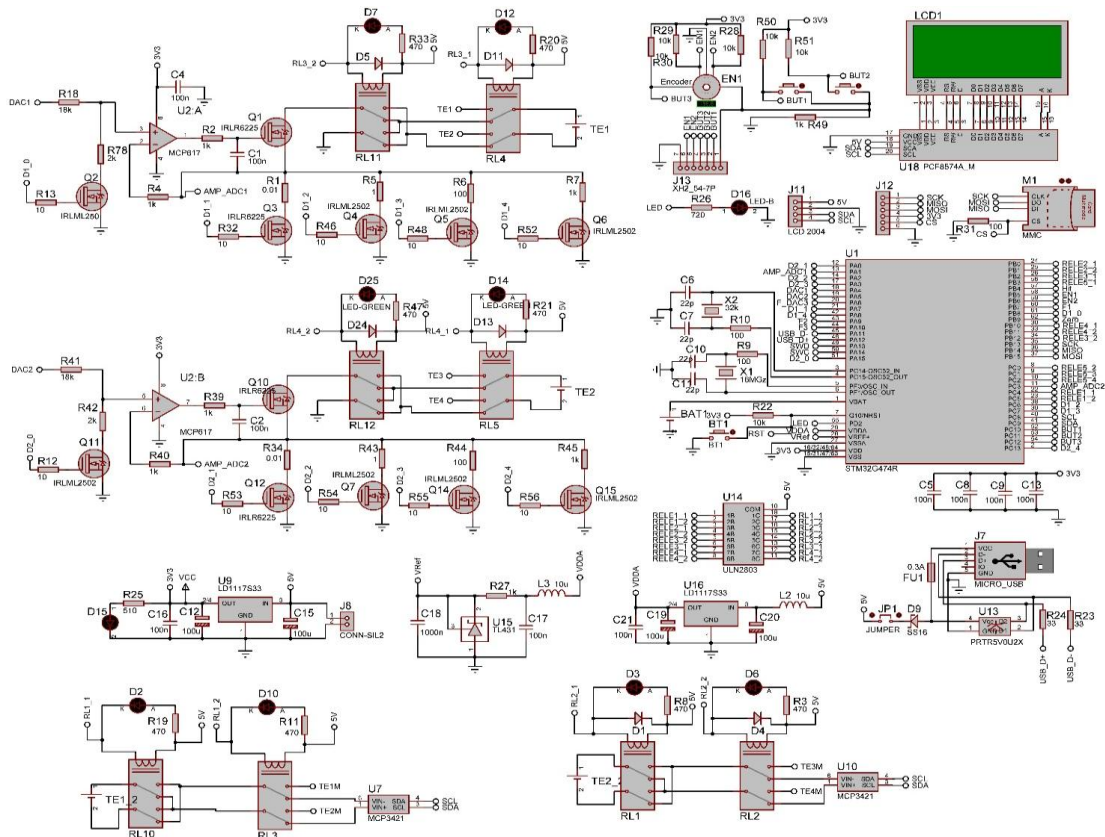
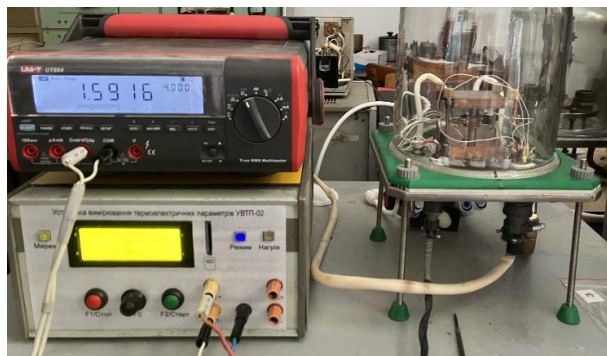


Рис. 3. Електрична принципова схема системи для автоматизованого дослідження термоелектричних властивостей.



а



б

Рис. 4. Блок керування (а) та загальний вигляд установки (б).

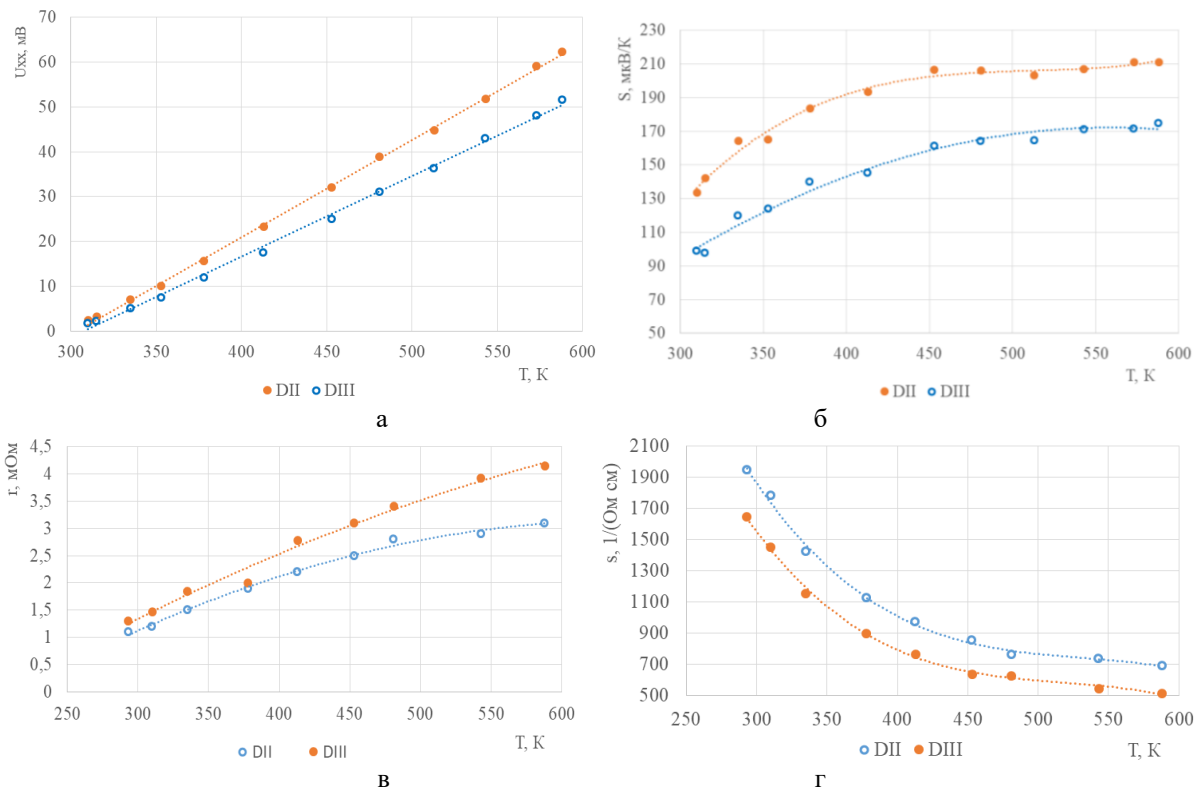


Рис. 5. Залежність електричних параметрів від температури гарячої сторони. Напруга холостого ходу (а), усереднений коефіцієнт термо-ЕРС (б), внутрішній опір (в), питома електропровідність (г). Температура холодної сторони $T_{\text{рад}} = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

нестандартних експериментів з реєстрацію даних не тільки з аналого-цифрових перетворювачів, а і з цифрового мільтиметра, виконання попередньої обробки та візуалізації даних. При тривалій регулярній експлуатації установка показала високу надійність, стабільність і точність результатів.

IV. Експериментальні дослідження та обговорення отриманих результатів

Розглянемо роботу комп'ютерної системи вимірювання на прикладі реальних досліджень серії зразків які складаються з гаряче спресованих зразків циліндричної форми холодна сторона яких складалася з Bi_2Te_3 а гаряча з GeTe .

Холодні спаї охолоджуються протічною водою і їх температура в процесі вимірювання практично незмінна. Зразки затиснуті між мідними радіаторами та нагрівником через тонкі 0,1 мм нікелеві пластини які і служать вимірювальними контактами, навантаження прикладали через підключення до мідної основи нагрівника та радіаторів. Вимірювання проводили у вакуумі $1 \cdot 10^{-1}$.

Параметри зразків наведено в табл. 1., а результати проведених досліджень на рис. 5.

Аналіз отриманих результатів та порівняння їх з результатами отриманими аналогічними методами в ручному режимі показав, що вибрані методи вимірювання та їх апаратно-програмна реалізація показали високу ефективність, дозволили можливість

суттєво скоротити трудозатрати на проведення експериментальних досліджень та підвищили точність вимірювання. Візуалізація отриманих результатів у вигляді графічних залежностей дає можливість виявляти промахи, дефектні зразки уже в процесі вимірювання. А візуалізація отриманих результатів у вигляді графічних залежностей дає можливість візуально виявляти промахи, дефектні зразки уже в процесі вимірювання.

Таблиця 1.

Параметри зразків Bi_2Te_3 GeTe .

№ зразка	Температура пресування	Діаметр	Довжина
DII	HP 450 C	D=8,1 mm	L=11 mm
DIII	HP 500 C	D=8,1 mm	L=9,5 mm

Висновки

1. Розроблена методика, вдосконалено конструкцію вимірювальної комірки, а також запропоновано концепцію і реалізацію апаратно-програмних засобів автоматизованого вимірювання термоелектричних параметрів напівпровідникових перетворювачів енергії.

2. Розроблено прецизійний програмно керований стабілізатор струму, показано що така схематехніка дозволяє проводити вимірювання електричних характеристик термоелектричних перетворювачів енергії в широкому діапазоні навантажень від одиниць мікроампер до декількох ампер. Це дало

можливість реалізувати ідею застосування для навантаження термоелемента алгоритму пошуку точки максимальної потужності.

3. З використанням розроблених засобів проведено експериментальні дослідження термоелектричних композитних високотемпературних матеріалів з відомими характеристиками та показано високу ефективність розроблених засобів, завдяки чому вдалося суттєво зменшити трудомісткість процесу дослідження основних електричних параметрів напівпровідникових матеріалів та одночасно підвищити точність отриманих результатів.

Робота виконана в рамках проекту МОН України “Багатофункціональна сенсорна мікросистема неінвазійного неперервного моніторингу та аналізу біосигналів людини” (державний реєстраційний номер 0124U000384).

Дзундза Б.С. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник;
Штунь М.В. – аспірант;
Домбровський С.В. – аспірант;
Дашевський З.М. – доктор наук, професор.

- [1] B. Beltrán-Pitarch, J. Prado-Gonjal, A.V. Powell, *Experimental conditions required for accurate measurements of electrical resistivity, thermal conductivity, and dimensionless figure of merit (ZT) using Harman and impedance spectroscopy methods*, Journal of Applied Physics, 125(2), 025111 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5077071>.
- [2] C.J. Vineis, A. Shakouri, A. Majumdar, M.G. Kanatzidis, *Nanostructured thermoelectrics: Big Efficiency Gains from Small Features*, Adv. Mater. 22, 3970 (2010); <https://doi.org/10.1002/adma.201000839>.
- [3] M.A. Ruvinskii, O.B. Kostyuk, B.S. Dzundza, M.L. Mokhnatskyi, Y.S. Yavorsky, *Kinetic phenomena and thermoelectric properties of polycrystalline thin films based on PbSnAgTe compounds*, Journal of Nano- and Electronic Physics, 9(5), 05004 (2017); [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(5\).05004](https://doi.org/10.21272/jnep.9(5).05004).
- [4] M.A. Ruvinskii, O.B. Kostyuk, B.S. Dzundza, *The influence of the size effects on the thermoelectrical properties of PbTe thin films*, Journal of nano- and electronic physics, 8(2), 02051 (2016); [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(2\).02051](https://doi.org/10.21272/jnep.8(2).02051).
- [5] Ashish Kumar, Ashutosh Patel, Saurabh Singh, K. Asokan, D. Kanjilal, *Apparatus for Seebeck coefficient measurement of wire, thin film and bulk materials in the wide temperature range (80 – 650 K)*, The Review of scientific instruments, (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5116186>.
- [6] J. Martin, T. Tritt, C. Uher, *High temperature Seebeck coefficient metrology*, Journal of Applied Physics, 108, (2010); <https://doi.org/10.1063/1.3503505>.
- [7] J. De Boor, E. Müller, *Data analysis for Seebeck coefficient measurements*, Review of scientific instruments, 84, 065102 (2013); <https://doi.org/10.1063/1.4807697>.
- [8] Ruifeng Xiong, Saeed Masoumi, Amir Pakdel, *An Automatic Apparatus for Simultaneous Measurement of Seebeck Coefficient and Electrical Resistivity*, Energies, 16(17), 6319 (2023); <https://doi.org/10.3390/en16176319>.
- [9] Quan Liu, Tao Huang, Xu Chen, Siyong Gu, Tongtong Duan, Mi Lu, Jianping Lin, *Measurement of non-equilibrium characteristics of thermoelectric materials*, Journal of Materials Research and Technology, 28, 2740 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.161>.
- [10] K. Huang F. Edler, *Multiphysics Simulation of Seebeck Coefficient Measurement*, Journal of Electronic Materials, 51, 3276 (2022); <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09577-9>.
- [11] Robin Werner, Jaroslaw Kita, Michael Gollner, Florian Linseis, Ralf Moos, *Gauge to simultaneously determine the electrical conductivity, the Hall constant, and the Seebeck coefficient up to 800 °C*, Journal of Sensors and Sensor Systems, 12, 69 (2023); <https://doi.org/10.5194/jsss-12-69-2023>.
- [12] E.K. Belonogov, S.B. Kushchev, Maxim Sumets, D.V. Serikov, *The Effect of Photonic Processing on Increasing the Thermoelectric Q-Factor of a Solid Solution Bi₂Te₃-Bi₂Se₃*, Inorganic Materials: Applied Research, 14(3), 595 (2024); <https://doi.org/10.1134/S2075113323030061>.
- [13] S. Dong, Y. Li, G. Chen, *An improved laser flash method for thermal conductivity measurement of molten salts*. Progress in Natural Science: Materials International, 34(1), 147 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2024.02.003>.
- [14] N. Nakamura, K. Takahashi, Y. Miyazaki, *Measurement of thermoelectric figure of merit using optical heating and thermography*. Science and Technology of Advanced Materials, 26(1), 2551485 (2025); <https://doi.org/10.1080/14686996.2025.2551485>.
- [15] B.S. Dzundza, O.B. Kostyuk, U.M. Pysklynets, Z.M. Dashevsky, *Development of high-precision hardware and software tools for automated determination of the characteristics of thermoelectric devices*, Physics and chemistry of solid state, 24(2), 278 (2023); <https://doi.org/10.15330/pcss.24.2.278-283>.

B.S. Dzundza¹, M.V. Shtun¹, S.V. Dombrovskiy¹, Z.M. Dashevsky²

Further development of methods and automation of measuring parameters of thermoelectric semiconductor energy converters

¹*Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, bohdan.dzundza@cnu.edu.ua*

²*Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel, zdashev@bgu.ac.il*

The concept and hardware and software tools for automated measurement of thermoelectric parameters of semiconductor energy converters have been developed. The system is built on the basis of advanced vacuum methods of direct measurements using a modern element base, high-precision analog-to-digital converters, which, in combination with software methods for processing the obtained experimental data, made it possible to increase the measurement accuracy. A precision software-controlled current stabilizer has been developed, which allows measuring the electrical characteristics of thermoelectric energy converters in a wide range of loads from units of microamperes to several amperes. The possibility of automated diagnostics and determination of operational parameters of semiconductor thermoelectric energy conversion modules, in particular thin-film ones, has been implemented, which makes it possible to reject defective modules and in general significantly increases the reliability of thermoelectric generators.

Experimental studies of a series of generator thermoelectric samples with known characteristics have been carried out and the effectiveness of the developed tools has been shown using the described methods for analyzing experimental data.

Keywords: thermoelectric converters, clean energy, automation, semiconductor structures, circuit design, microprocessor, computer modeling, 3D modeling, digital-to-analog converter.