

УДК 53.082

Анатичук Л.І., ак. НАН України Гаврилюк М.В.,
Лисько В.В., канд. фіз. – мат. наук Тюменцев В.А.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна, e-mail: anatyach@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЯ ВИМІРЮВАНЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ

Представлено результати розробки системи автоматизації процесу вимірювань термоелектричних властивостей матеріалів і обробки їх результатів. Блок керування вимірюваннями побудовано на основі багатоканального аналогово-цифрового перетворювача. Управління процесом вимірювань, обробка та відображення результатів проводяться за допомогою комп'ютера, до якого блок вимірювань підключається по стандартному каналу USB. Результати відображаються у вигляді графіків і таблиць. Розроблена система автоматизації є універсальною та дозволяє реалізовувати як класичні стаціонарні методи вимірювань термоелектричних властивостей матеріалів, так і складні алгоритми вимірювань з підвищеною швидкістю. Наведено приклад використання розробленої системи для визначення термоелектричних властивостей матеріалу комплексним абсолютним методом. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, термоелектричний матеріал, автоматизація, комп'ютеризація.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Відомо, що успіхи у термоелектриці у великій мірі залежать від якості термоелектричного матеріалу, яка визначається добротністю матеріалу Z і від якої залежить ефективність термоелектричних перетворювачів енергії – ККД генераторів, максимальний перепад температур та холодильний коефіцієнт охолоджувачів, опалювальний коефіцієнт нагрівачів [1, 2]. Для підвищення добротності Z використовують експериментальні методи оптимізації матеріалів, вирішальну роль у яких відіграє коректне вимірювання їх параметрів [3].

Одним з найкращих для визначення добротності матеріалів є комплексний абсолютний метод. Він володіє важливими перевагами:

- вимірювання електропровідності σ , термоЕРС α і теплопровідності κ проводяться одночасно на одному зразку, що знижує похибки при визначенні добротності Z ;
- термоелектричні параметри знаходяться з класичних формул без застосування поправок;
- метод дозволяє звести до мінімуму різноманітні похибки.

В роботах [4-8] наведено результати комплексних досліджень, проведених в Інституті термоелектрики НАН України та МОН України, направлених на розробку методів мінімізації похибок абсолютного методу. Результатом цих досліджень є створення вимірювального

обладнання, точність якого у визначенні добротності у 3-5 разів переважає точність вимірювання при використанні інших методів.

У роботі [9] наведено також способи підвищення швидкодії при використанні абсолютного методу шляхом застосування імпульсів змінного струму для пришвидшення досягнення стаціонарних умов у досліджуваних зразках, а також програмованого форсованого розігріву зразка та термостату. Реалізація цих складних алгоритмів вимагає повної автоматизації процесу вимірювань. Крім того, це дозволить усунути можливі суб'єктивні помилки операторів при вимірюваннях електричних сигналів, їх обробки для визначення σ , α , κ , Z , при побудові графіків та таблиць, що визначають залежності цих параметрів від концентрації домішок, складу та структури матеріалу та інших факторів.

Тому метою роботи було створення комп'ютеризованої системи керування вимірюваннями для автоматизації процесів визначення термоелектричних властивостей матеріалів, обробки і відображення їх результатів.

Вимоги до автоматизації вимірювань.

Схема комплексного абсолютного методу, взятого за основу при створенні автоматизованого обладнання, наведена на рис. 1.

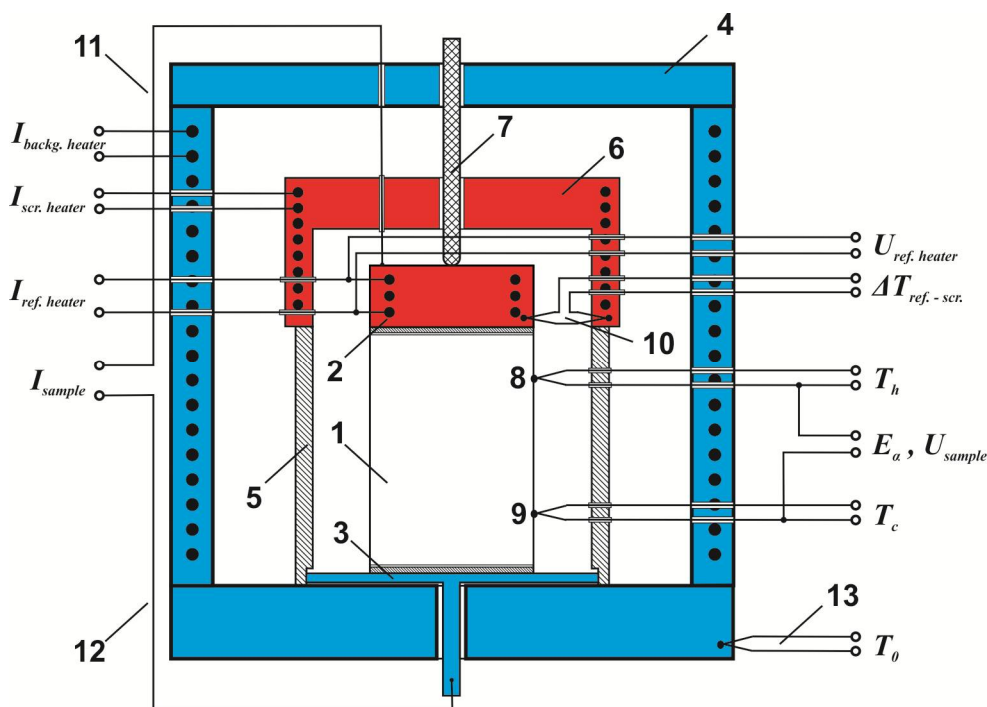


Рис. 1. Комплексний абсолютний метод вимірювання термоелектричних параметрів матеріалів. 1 – досліджуваний зразок; 2 – еталонний нагрівник; 3 – посадочна площадка; 4 – термостат; 5 – екран; 6 – нагрівник екрану; 7 – притиск; 8, 9 – вимірювальні зонди-термопари; 10 – нуль-термопара; 11, 12 – струмопідводи зразка; 13 – термопара термостату; I_{sample} , U_{sample} – струм через зразок та спад напруги між вимірювальними зондами-термопарами при вимірюванні електропровідності; E_{α} – термоЕРС між однаковими гілками зондів-термопар; T_h і T_c – «гаряча» та «холодна» температури на зразку; $I_{ref.heater}$, $U_{ref.heater}$ – струм та напруга живлення еталонного нагрівника при вимірюванні теплопровідності; $I_{scr.heater}$ – струм живлення нагрівника екрану; $I_{backg.heater}$ – струм живлення фонового екрану.

Термоелектричні параметри досліджуваного зразка визначаються за формулами

$$\sigma = \frac{I_{sample}}{U_{sample}} \frac{l}{S}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{E_{\alpha}}{T_h - T_c}, \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{I_{ref.heater} \cdot U_{ref.heater}}{T_h - T_c} \frac{l}{S}, \quad (3)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (4)$$

де l – відстань між зондами, S – площа поперечного перерізу зразка.

Для реалізації такого методу система керування вимірюваннями повинна мати:

- засоби задання та підтримання температури вимірювального термостату у широкому інтервалі температур (терморегулятор, блок живлення, контрольна термопара тощо);
- регульований блок живлення для пропускання струму через зразок при вимірюванні електропровідності, комутатор струму;
- регульований блок живлення еталонного нагрівника;
- засоби підтримання нульового перепаду температур між еталонним та екранним нагрівниками (терморегулятор, блок живлення, контрольна нуль-термопара тощо);
- високоточний вимірювач напруги з розрізною здатністю не менше 1 мкВ;
- можливість задання необхідної циклограми включення/виключення блоків живлення та моментів запису результатів вимірювання всіх вимірювальних каналів (температур «гарячого» та «холодного» зондів, спаду напруги між зондами, величин струму та напруги через зразок, струму та напруги живлення еталонного нагрівника);
- можливість передавання результатів вимірювань на комп'ютер для їх подальшої обробки, побудови графіків та таблиць, формування паспорту зразка.

Опис блоку керування вимірюваннями.

Розроблено універсальні блоки, які мають дискретні входи управління і відповідні аналогові виходи. Комбінуючи ці блоки і керуючи ними по необхідних циклограмах за допомогою програмованого контролера, можна створити різні установки, що дозволяють здійснити будь-який спосіб вимірювання параметрів термоелектричних матеріалів. Розроблена також система для автоматизації вимірювань, блок-схема якої наведена на рис. 2. Вона побудована на основі 24-розрядного 8-канального аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) 4 з диференціальними входами, діапазон вимірюваних напруг якого – $\pm (5 \text{ мкВ} - 2.5 \text{ В})$. Диференціальні входи АЦП дозволяють проводити високоточні вимірювання напруг в електричних колах різних блоків, які можуть мати різні джерела живлення.

До складу системи також входять інтелектуальні ключі 6 і 7 зі своїми схемами захисту від короткого замикання і перевищення заданого струму. Застосування таких ключів забезпечує високу надійність установки, запобігаючи виходу її з ладу при неполадках в силових колах. Застосування у якості елементної бази сучасних польових транзисторів, виготовлених за MOSFET технологією, з низьким опором у відкритому стані, зменшує виділення на ньому

тепла, що дозволило обійтися без радіаторів. Ключі здатні при цьому комутувати навантаження до 600 Вт.

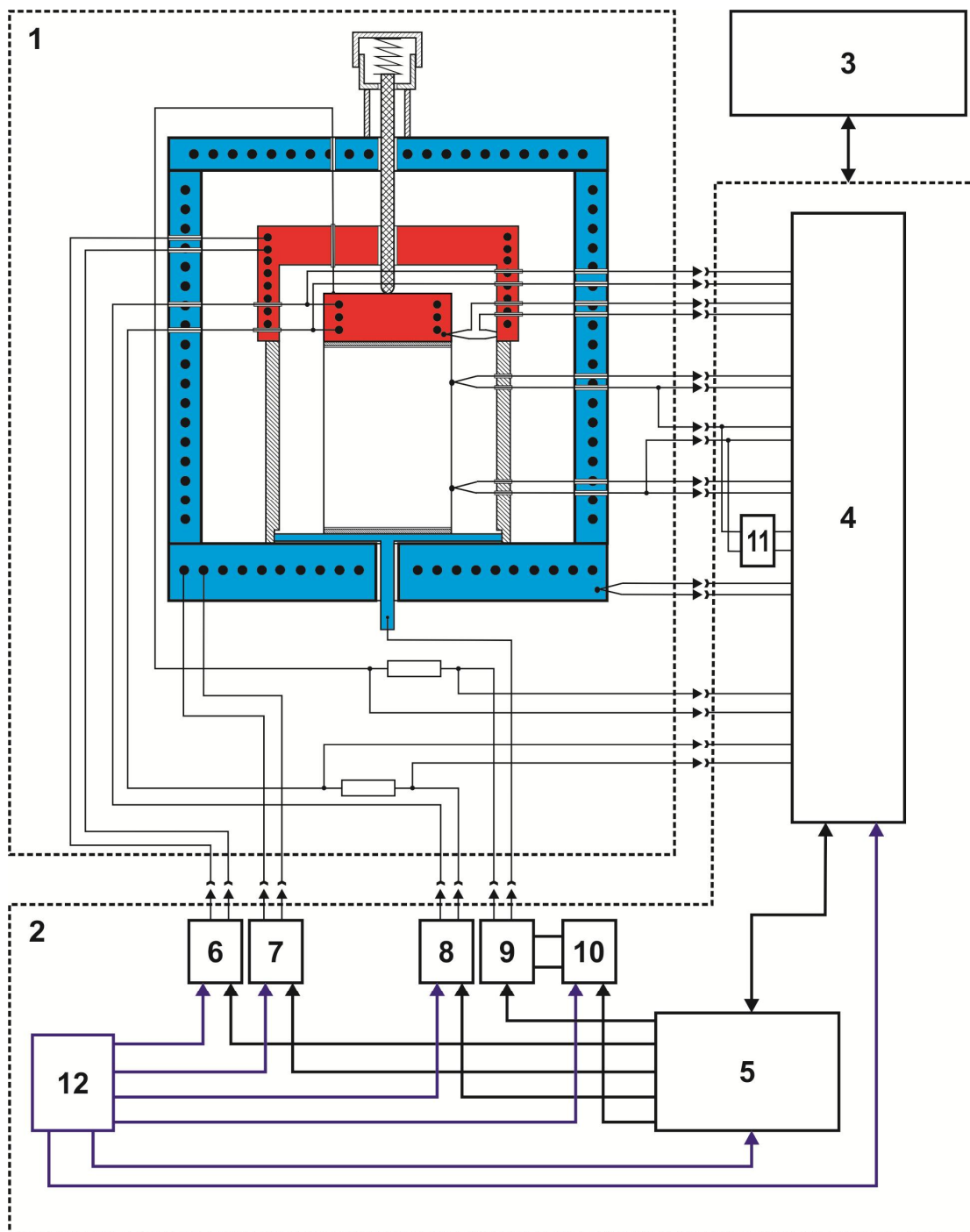


Рис. 2. Блок схема автоматизації вимірювань термоелектричних параметрів матеріалів комплексним абсолютним методом. 1 – вимірювальний блок; 2 – блок керування вимірюваннями; 3 – комп'ютер; 4 – аналогово-цифровий перетворювач; 5 – контролер; 6, 7 – ключі; 8, 10 – джерела регульованої напруги; 9 – електронний комутатор; 11 – синхронний детектор; 12 – блок живлення.

Для живлення еталонного нагрівача стабільною напругою використано регульоване стабільне джерело напруги 8. Воно може забезпечувати потужність еталонного нагрівача до 10 Вт.

Електронний комутатор 9 дозволяє включати або відключати струм через зразок, змінювати напрямок струму, а також живити його знакозмінним струмом. Комутатор зібраний за схемою Н-моста на базі потужних польових MOSFET транзисторів. Струм електронного комутатора може бути в межах від 0,01А до 8.0 А.

Регульоване джерело стабільного струму 10 забезпечує струм через зразок, який можна встановлювати в межах від 0.05 А до 4.0А. Синхронний детектор 11 дозволяє точно детектувати знакозмінні напруги, а також вимірювати імпульсні значення напруг на зразку. Синхронний детектор зібраний за ключовою схемою, з різними дискретними входами управління, керуючи якими можна реалізувати різні режими роботи при імпульсному живленні зразка.

Система містить блок управління виконавчими механізмами. У даному методі у якості виконавчого механізму служать звуковий зумер, що сигналізує про закінчення циклу або завершення роботи. Якщо система використовується у обладнанні для дослідження неоднорідності зразків цей блок може управляти кроковими двигунами для створення програмованого переміщення зондів по поверхні досліджуваного зразка.

Програмований контролер 5 містить два ПД ШІМ- регулятори температури, дискретні виходи яких забезпечують автоматичну або ручну роботу установки відповідно до заданих циклограм і алгоритмів роботи та вхід для обробки сигналу, що надходить з АЦП.

Блок живлення установки 12 зібраний на базі силового тороїдального трансформатора і лінійних стабілізаторів напруги без високочастотного шуму, властивого імпульсним джерелам живлення, що підвищує точність вимірювань.

Вимірювальний блок по каналу USB підключений до персонального комп'ютера 3, де задаються циклограми вимірювань, відбуваються необхідні обчислення, будуються відповідні графіки, формуються протоколи вимірювань.

При використанні вимірювального блоку, розробленого для діапазону температур 30 – 500 °С, створена система працює наступним чином.

Один терморегулятор контролера через ключ управляє нагрівачем термостата, який підтримує фонову температуру T_0 з похибкою не більше ± 0.1 °С. Величина фонові температури задається на вхід регулятора із заданої на комп'ютері таблиці. Другим терморегулятором екранного нагрівача підтримується нульова різниця температур між еталонним і екранним нагрівачами з похибкою не більше ± 0.1 °С. Електронний комутатор за допомогою джерела регульованого струму забезпечує прямий, реверсний та знакозмінний струм через зразок. Синхронний детектор випрямляє знакозмінні напруги на зразку, якщо електропровідність вимірюють на знакозмінному струмі. Аналогово-цифровий перетворювач вимірює фонову температуру, температури термопар-зондів, спад напруги між зондами, струм через зразок, напругу і струм через еталонний нагрівач. Всі виміряні сигнали надходять в контролер, де нормуються до конкретних фізичних величин, а потім надходять в персональний комп'ютер для обчислень та побудови графіків в заданому діапазоні температур. Послідовність вимірювань та часові витримки між ними задаються у циклограмі, яку формує оператор перед початком вимірювань.

Технічні характеристики розробленої системи дозволяють проводити вимірювання для широкого діапазону параметрів досліджуваних матеріалів: електропровідності – від 10 до 10000 Ом⁻¹см⁻¹; термоЕРС – від ± 10 до ± 500 мкВ/К; теплопровідності – від 0.1 до 20 Вт/(м · К) (для зразків діаметром 6-8 мм та довжиною 8-13 мм).

Розроблена система є універсальною. Кількість і характеристики керуючих та вимірюва-

льних каналів дозволяє застосовувати її і для інших методів вимірювання – порівняльного методу, методу Хармана, методів дослідження неоднорідності злитків та дисків термоелектричних матеріалів, тощо.

Програмне забезпечення для комп'ютеризації вимірювань.

Система управляється комп'ютером з програмним забезпеченням «SThEM», розробленим сумісно з НПП «Терекс» (м. Київ, Україна). Програма дозволяє виконувати вимірювання в режимі реального часу, обробляти результат вимірювання, виводити дані на екран у вигляді графіків і таблиць, зберігати їх на комп'ютері, експортувати в MS Excel, роздруковувати.

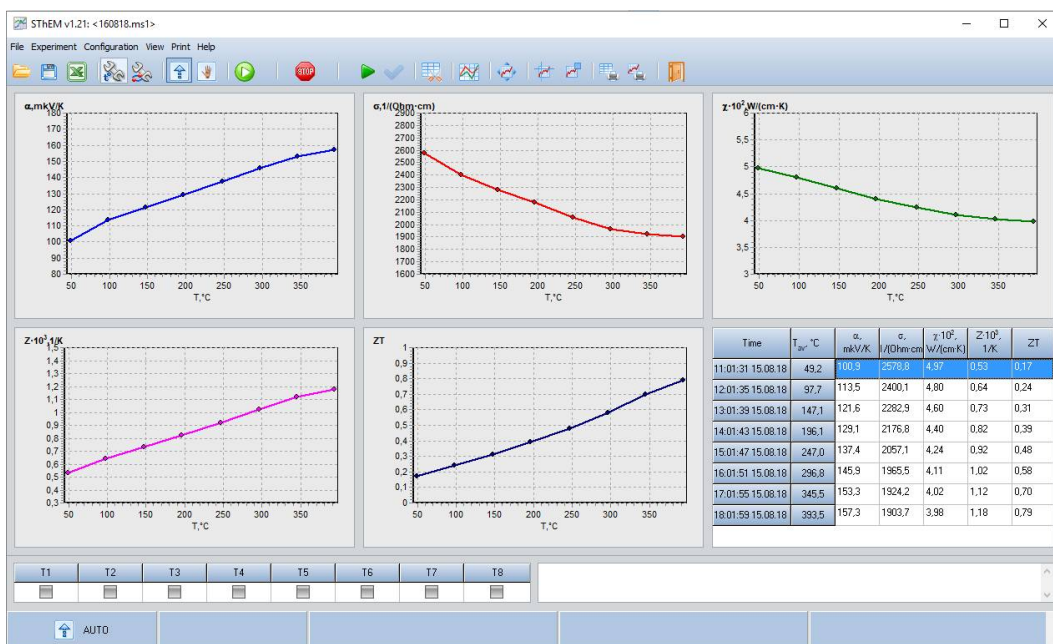


Рис. 3. Зовнішній вигляд головного вікна програми SThEM для управління процесом вимірювань.

Програма керування вимірюваннями «SThEM» має стандартну структуру, прийнятну в операційній системі Windows (рис. 3). Вона містить засоби управління процесом вимірювання (вікна налаштування експерименту, індикатори включення/виключення струму через зразок, живлення нагрівника гарячого зонда, тощо), область побудови графіків результатів вимірювань, таблиці з вимірними величинами та розраховані значення властивостей зразка.

У програмі «SThEM» також відбувається задання параметрів блоку керування – налаштувань вимірювальних каналів та терморегуляторів.

Кожен з восьми вимірювальних каналів може бути налаштований використовуючи поліноміальну залежність 7-ї степені між вимірним сигналом X_i та вихідним – Y_i

$$Y_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 X_i^2 + a_3 X_i^3 + a_4 X_i^4 + a_5 X_i^5 + a_6 X_i^6 + a_7 X_i^7, \quad (5)$$

да $a_0 - a_7$ – коефіцієнти поліномів кожного каналу, які задаються оператором.

Це дає можливість з високою точністю (до 0.1 мкВ) задати переведення ЕРС вимірювальних термопар у градуси відповідно до їх градувальних характеристик, а також коефіцієнти переведу інших сигналів відповідно до використаних еталонних опорів, дільників напруги тощо.

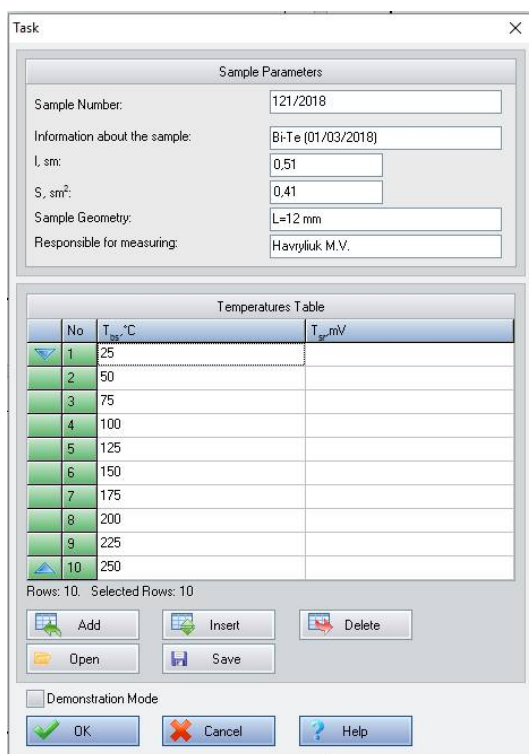


Рис. 4. Вікно задання параметрів експерименту у програмі STheM

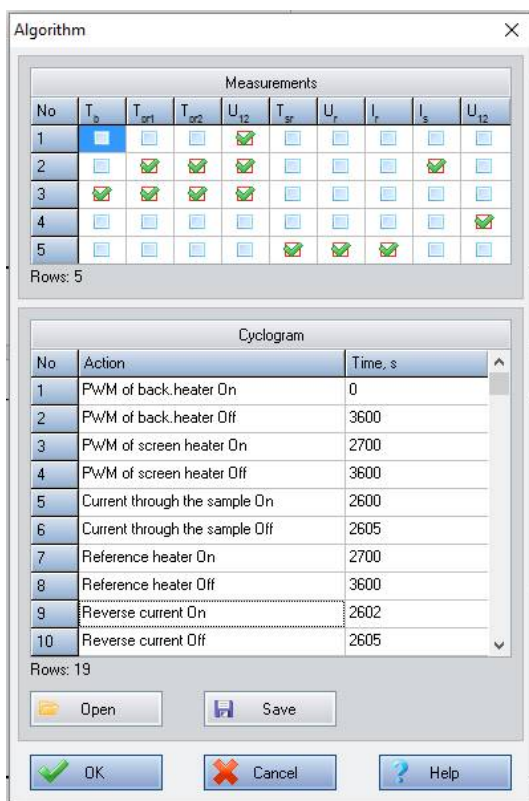


Рис. 5. Вікно формування циклограми вимірювань у програмі STheM

Перед початком вимірювань оператор заносить інформацію про досліджуваний зразок у вікно задання параметрів експерименту (рис. 4) та вибирає потрібні температури, при яких будуть в автоматичному режимі проведені вимірювання.

Також програма дозволяє налаштувати циклограму вимірювань (рис. 5) – моменти запису показів вимірювальних каналів, включення та виключення струму через зразок, живлення еталонного нагрівника тощо.

На основі розробленої системи управління було проведено автоматизацію вимірювального обладнання «АЛТЕК-10001» та «АЛТЕК-10001М» для вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів у інтервалах температур 30 – 500 °С та 30 – 900 °С відповідно.

Висновки

1. Розроблено універсальну електронну систему керування, що дозволяє реалізовувати автоматизовані вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів різними методами, зокрема комплексним абсолютним методом. Автоматизоване вимірювальне обладнання на основі такої системи дозволяє проводити вимірювання для широкого діапазону параметрів досліджуваних матеріалів: електропровідності – від 10 до 10000 Ом⁻¹см⁻¹; термоЕРС – від ±10 до ±500 мкВ/К; теплопровідності – від 0.1 до 20 Вт/(м · К).
2. Створено програмне забезпечення для комп'ютеризації процесу вимірювань. Програма дозволяє виконувати вимірювання в режимі реального часу, обробляти їх результати, виводити результати вимірювань на екран у вигляді графіків і таблиць, зберігати їх на комп'ютері, експортувати в MS Excel, роздруковувати паспорт дослідженого зразка.

Література

1. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы, М.-Л.: АН СССР, 188 с., 1960.
2. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства, К.: Наук. думка, 768 с., 1978.
3. V. Lysko. Metrology of materials and its role in development of thermoelectricity, XVI International Forum On Thermoelectricity, Paris, France, 2015.
4. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Дослідження впливу випромінювання на точність вимірювання теплопровідності абсолютним методом, Термоелектрика, №1, с. 67-76, 2012.
5. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Пристрій для визначення електропровідності, теплопровідності та термоЕРС термоелектричних матеріалів, Патент України № 71614, 2012.
6. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Способи забезпечення якісних електричних та теплових контактів при вимірюванні параметрів термоелектричних параметрів, Термоелектрика, №4, 2014.
7. Anatychuk L.I., Lysko V.V. On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermo-electric materials, Journal of Electronic Materials, Volume 43, Issue 10, p. 3863-3869, 2014.
8. Лисько В.В. Про температурні залежності похибок вимірювання теплопровідності абсолютним методом, Тер-моелектрика, №2, 2016.
9. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Про підвищення швидкодії при вимірюванні теплопровідності абсолютним методом, Термоелектрика, №5, 2014.

Надійшла до редакції: 10.07.2018

Анатичук Л.І., *ак. НАН України,*^{1,2} **Гаврилюк М.В.,**^{1,2}
Лысько В.В., *канд. физ – мат. наук,*^{1,2} **Тюменцев В.А.**¹

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна, *e-mail: anatysh@gmail.com*

Представлены результаты разработки системы автоматизации процесса измерений термоэлектрических свойств материалов и обработки их результатов. Блок управления измерениями построен на основе многоканального аналого-цифрового преобразователя. Управление процессом измерений, обработка и отображение результатов проводятся с помощью компьютера, к которому блок измерений подключается по стандартному каналу USB. Результаты отображаются в виде графиков и таблиц. Разработанная система автоматизации является универсальной и позволяет реализовывать как классические стационарные методы измерений термоэлектрических свойств материалов, так и сложные алгоритмы измерений с повышенным быстродействием. Приведен пример использования разработанной системы для определения термоэлектрических свойств материала комплексным абсолютным методом. Библ. 9, рис. 5.

Ключевые слова: электропроводимость, термоЕРС, теплопроводимость, термоэлектрический материал, автоматизация, компьютеризация.

L.I. Anatyshuk, *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2},
M.V. Havryliuk, V.V. Lysko, V.A. cand. Phys.-math. sciences^{1,2} **Tiumentsev**¹

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine,
e-mail: anatysh@gmail.com

AUTOMATION AND COMPUTERIZATION OF MEASUREMENTS OF THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS

The results of development of the automation system for measuring the thermoelectric properties of materials and their data processing are presented. The measurement control unit is based on a multichannel analog-to-digital converter. Measurement process control, processing and display of results are carried out using a computer to which the measurement unit is connected via a standard USB channel. The results are displayed as graphs and tables. The developed automation system is universal and allows realizing both classic stationary methods of measuring thermoelectric properties of materials and complex measurement algorithms with increased speed.

An example of using the developed system to determine the thermoelectric properties of a material by the complex absolute method is given. Bibl. 9, Fig. 5.

Key words: electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, thermoelectric material, automation, computerization.

References

1. Ioffe A.F. (1960). *Poluprovodnikovyye termoelementy (Semiconductor thermoelements)*. Moscow-Leningrad: AN SSSR [in Russian].
2. Anatychuk L.I. (1978). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva (Thermoelements and thermoelectric devices)*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
3. V. Lysko. (2015). Metrology of materials and its role in development of thermoelectricity. *Proc. of XVI International Forum on Thermoelectricity*. (Paris, France, 2015).
4. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 1, 67-76.
5. *Patent of Ukraine № 71614* (2012). Anatychuk L.I., Lysko V.V. Device for determining the electrical conductivity, thermal conductivity and thermoEMF of thermoelectric materials [in Ukrainian].
6. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2014). Methods for assuring high quality electric and thermal contacts when measuring parameters of thermoelectric materials. *J. Thermoelectricity*, 4.
8. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 43(10), 3863-3869.
9. Lysko V.V. (2016). On the temperature dependences of errors in measuring thermal conductivity by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 2.
10. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2014). Increasing the rapidity of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 5.

Submitted: 10.07.2018