PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 22, No. 2 (2021) pp. 278 -283
Section: Technology

DOI: 10.15330/pcss.22.2.278-283

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University

ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 22, № 2 (2021) С. 278-283
Технічні науки

УДК 621.315.592 ISSN 1729-4428

Б.С. Дзундза[1,2], О.Б. Костюк[2,3], З.М. Дашевський[4]

Особливості проектування комп'ютерних систем керування прецизійними термоелектричними охолоджувачами

[1]Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, bohdan.dzundza@pnu.edu.ua
[2]ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», Івано-Франківськ, Україна
[3]Івано-Франківський національний медичний університет, Івано-Франківськ, Україна, oksanakostuk@gmail.com
[4] Університет Бен-Гуріона, Ізраїль, dashevsky.45@mail.ru

Розроблено ефективну електричну схему та алгоритм роботи, а також робочий зразок термоелектричного прецизійного термостата з можливістю автономної роботи, безперервного контролю та ведення журналу реєстрації температур за допомогою комп'ютера або смартфона. Показано, що розроблений алгоритм забезпечує ефективне безударне управління та точність підтримання температури 0,03 °С, з енергоспоживанням 3 - 7 Вт. Розроблена конструкція та спеціалізована комп'ютерна система управління багатокаскадним кріогенним термоелектричним охолоджувачем.

Ключові слова: термоелектричний термостат, регулятор температури, комп’ютерна система.

Подано до редакції 27.04.2021; прийнято до друку 14.05.2021.

Вступ

Термоелектричні теплові насоси мають ряд важливих переваг для побудови на їх основі компактних термостатів, зокрема мініатюрних холодильників з високим часом автономності для біомедичних застосувань, випромінювачів у вигляді моделі абсолютно чорного тіла для калі бровки тепловізорів та пірометрів, а також у наукових дослідженнях [1,2].

Окремим важливим аспектом є розробка кріогенних термоелектричних охолоджувачів, що працюють при температурах нижче 100 К, пов'язана з потребами аерокосмічної промисловості в супутникових системах охолодження, особливо в датчиках радіаційного випромінювання та інфрачервоного випромінювання [3-7]. Що викликає особливий інтерес до термоелектричних охолоджувачів для високоефективного охолодження вакууму до рівня нижче 150 К. Шестикаскадні термоелектричні модулі, що використовують класичні термоелектричні матеріали на основі твердих розчинів $(Bi, Sb)_2(Te, Se)_3$, при виборі оптимальних складів забезпечують максимальна різниця температур 135 - 145 К [8]. Інтегральні сенсори кріогенних температур описані в роботах [9, 10]. Властивості термоелектричних матеріалів на основі PbTe досліджували в роботах [11-13], де показали їх достатню ефективність.

Фотодіоди на основі сполук InSb є традиційними напівпровідниковими датчиками в середній інфрачервоній області, і потребують для роботи охолодження до температури рідкого азоту 77 К [14, 15]. Напівпровідникові матеріали на основі сполуки PbTe, мають близькі значення Eg = 210 меВ (Т = 77 К), і також використовується для виготовлення ІЧ-датчиків [16, 17]. Перевагою PbTe у порівнянні з InSb є збільшення ширини забороненої зони зі зростання робочих температур. Таким чином, можна використовувати фотодіоди PbTe до а температура охолодження 180 К [18], що дало можливість охолоджувати ці датчики за допомогою багатокаскадного термоелектричного модуля [19].

Основними перевагами систем на основі термоелектричних перетворювачів є їх компактний розмір та висока надійність та тривалий термін

експлуатації без сервісного обслуговування. Також слід відзначити мінімальну інертність і можливість дуже швидко перемикатися між режимом поглинання та виділення тепла. Це дозволяє проектувати прецизійні системи термостабілізації, але потребує розробки ефективних програмних та схемотехнічних рішень.

Традиційно основні якісні показники систем автоматичного регулювання формулюються виходячи з вимог до форми реакції замкнутої системи на ступінчасту зміна уставки. Проте такий критерій сильно обмежений, зокрема, він нічого не говорить про величину ослаблення шумів вимірювань або впливу зовнішніх збурень [18].

I. Особливості розробки прецизійного термоелектричного термостата

Оскільки в прецизійних системах виникає необхідність підтримувати температуру з точністю до 0,01 С то найбільш важливим факторами є: форма відгуку на зовнішні збурення, зокрема перерегулювання та час встановлення заданої температури; форма відгуку на шуми вимірювань та їх мінімізація; у випадку автономних застосувань економія енергії в режимі підтримання заданої температури. З іншого боку використання термоелектричних перетворювачі накладає ряд обмежень, зокрема обмежений динамічний діапазон змін в системі та необхідність плавного перемикання режимів регулювання. Зокрема, не рекомендується напряму використовувати широтно-імпульсну модуляцію для управління потужністю термоелемента так як ударні навантаження значно скорочують термін експлуатації термоелемента. Дискретна реалізація регулятора для забезпечення потрібної точності вимагає використання АЦП з високою роздільною здатністю. Так як ефективність термоелемента залежить не тільки від підведеної потужності, а і від температури протилежного спаю та ефективності відведення тепла від нього. При певній підведеній потужності термоелемент може забезпечити визначену максимальну різницю температури між холодною та гарячою стороною, і можлива ситуація коли збільшення потужності термоелемента не призводить до зниження температури холодної сторони, через швидке зростання температури гарячої сторони викликане обмеженістю можливості відводу тепла в конкретних умовах. Тому необхідно передбачити додатковий зворотній зв'язок і алгоритм корекції роботи системи з врахуванням температури протилежного спаю термоелемента, а також запас потужності системи охолодження та ефективні алгоритми управління нею.

Важливою перевагою теплових систем на основі термоелектричних перетворювачів є відсутність обмеження нульовою потужністю охолодження (нагріву), тобто якщо ПІД регулятор вимагає подати на об'єкт від'ємний вплив, контролер змінюючи полярність термоелемента і перекачування тепла відбувається в зворотному напрямку. Реалізація такого алгоритму значно підвищує точність і швидкість регулювання.

У сталому режимі роботи і при малих збуреннях, зокрема потрібно забезпечити відсутність стрибків температури гарячої сторони термоелемента, система з ПІД регулятором є практично лінійною. Але процес виходу на режим є нелінійним, що пов'язано обмеженням на потужність. Основним проявом режиму обмеження є інтегральне насичення в процесі виходу системи на режим, що призводить до затягування перехідного процесу. Суть цієї проблеми в тому, що якщо сигнал на вході досягнув обмеження, сигнал на виході інтегратора продовжує зростати, але цей сигнал уже не бере участі в регулюванні внаслідок ефекту насичення. Компенсація ефекту інтегрального насичення можлива за допомогою додаткового зворотного зв'язку для передачі сигналів помилок на вході інтегратора, або за допомогою алгоритмічної заборони інтегрування при насиченні, що і було реалізовано.

Враховуючи зазначені особливості було розроблено структурну схему системи керування прецизійним термоелектричним термостатом (рис. 2).

Так як цифровий регулятор опрацьовує дискретні значення то на точність регулювання суттєво впливає роздільна здатність вимірювання температури. Для забезпечення високої точності у якості давача температури застосовано прецизійний платиновий терморезистор PT100 увімкнений в мостову схему (рис. 3), інші плечі вимірювального моста побудовані на високоточних термостабільних резисторах. Вимірювальний міст живиться від прецизійного джерела опорної напруги. Напруга розбалансу моста подається на диференціальний вхід 18 розрядного I2C АЦП, з вбудованим програмнокерованим підсилювачем вхідного сигналу. При правильно підібраних компонентах дискретність вимірювання температури складатиме не менше 0,01 ^{0}C.

Модуль плавного керування потужністю термоелектричного модуля реалізовано за схемою DC-DC перетворювача напруги. Мікроконтролер за допомогою широтно-імпульсно модульованого сигналу через транзистор і силовий дросель може плавно змінювати напругу на термоелементі в діапазоні практично від нуля до напруги живлення. За допомогою внутрішнього АЦП контролер вимірює напругу і через шунт струм, таким чином реалізовано зворотній зв'язок по потужності. Переключення режимів роботи охолодження-нагрів термоелемента реалізовано по класичній схемі Н-моста на опторозвязаних MOS FET зборках TLP5752. Така реалізація по перше забезпечує широкій діапазон вхідних напруг і високій ККД перетворювача, що дає можливість в усталеному режимі подавати на термоелемент невелику потужність (3 - 7 Вт) з мінімальними втратами на силових елементах схеми, по друге забезпечує плавний (безударний) режим роботи термоелемента для максимального його терміну експлуатації.

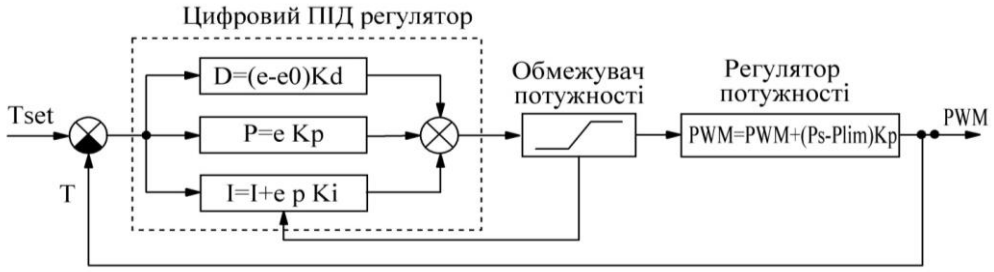


Рис. 1. Цифровий під регулятор з компенсацією ефекту інтегрального насичення.

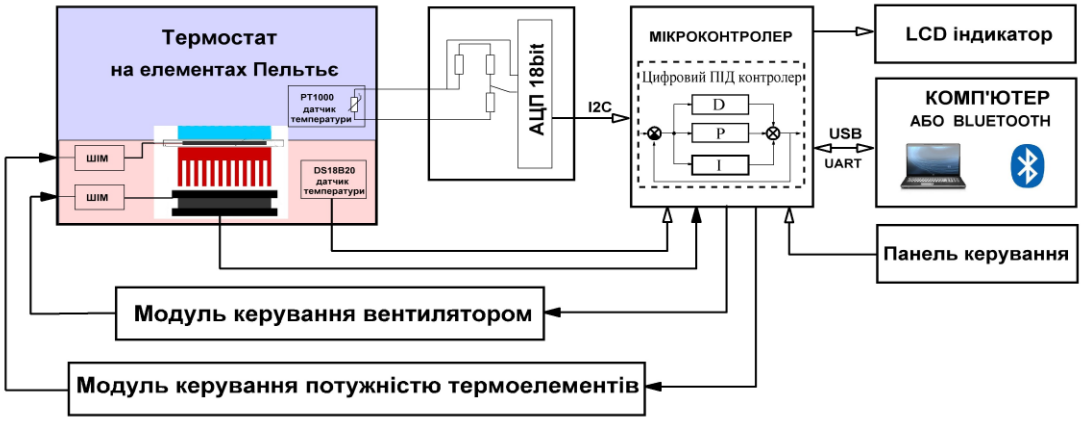


Рис. 2. Структурна схема системи керування прецизійним термоелектричним термостатом.

Дані схемотехнічні та програмні рішення дали можливість спроектувати малогабаритний прецизійний термостат (рис. 4), з широким діапазоном вхідних напруг 12 - 24 В для можливості використанні як в стаціонарному режимі, так і в автотранспорті, а також автономної роботи при живленні від портативного Li-ion акумулятора.

Перевагами такої конструкції є простота і висока надійність, компактність і портативність, при вазі 1 - 1,5 кг корисний об'єм внутрішньої камери складає 1,125 л. Точність підтримання температури ± 0,03 ^{0}C.

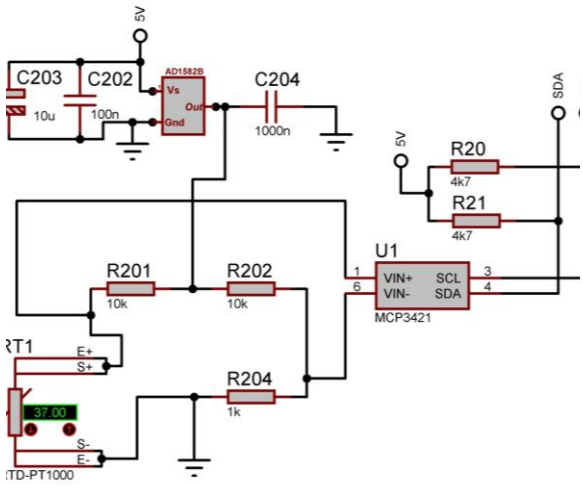
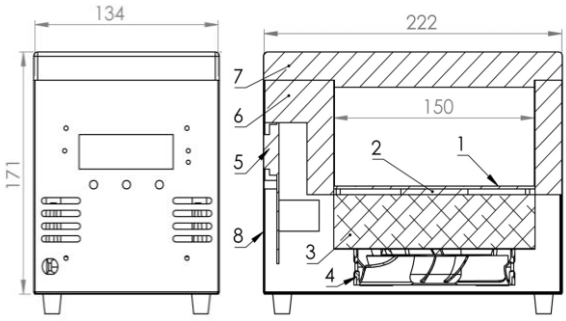
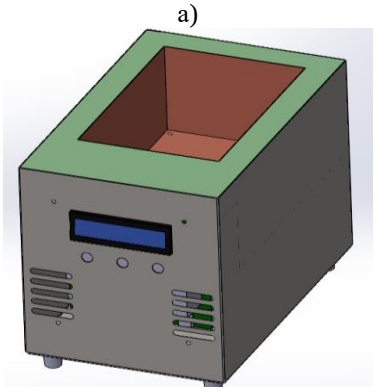


Рис. 3. Принципова схема вимірювання температури.



а)



б)

Рис. 4. Конструкція (а), та загальний вигляд (б) термоелектричного термостата. 1 – внутрішня камера (алюміній або мідь), 2 – термоелектричний елемент, 3 – Алюмінієвий радіатор, 4 – вентилятор, 5 – плата контролера з дисплеєм та елементами керування, 6 – термоізоляція , 7 – кришка (пінополістирол), 8 – корпус із нержавіючої сталі.

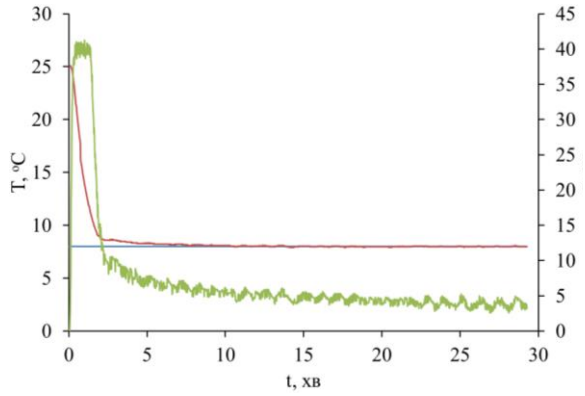


Рис. 5. Графік виходу термоелектричного термостата на режим. Задана температура – синя крива, Температура в камері – червона крива, потужність термоелемента – зелена крива.

Вихід на режим займає близько 10 хв, зображений на рис. 5.

Як видно з графіка, в усталеному режимі потужність споживана термоелементом складає не більше 5 Вт при температурі навколишнього середовища 25 °С. Що, враховуючи 1,5 Вт, які споживає вентилятор і електроніка, дає час автономної роботи від літієвого акумулятора ємністю 45 Ват годин (маса 0,5 кг) близько 7 годин.

Основним недоліком термостату на термоелектричних елементах є швидке зростання температури в камері при припиненні електроживлення. Це пов’язане з перетіканням тепла яке запасається в радіаторі гарячої сторони (близько 40 °С) через термоелементи і практично не залежить від термоізоляції корпусу. Враховуючи це, автономне живлення для таких приладів в багатьох випадках є обов’язковим.

II. Розробка багатокаскадного кріогенного термоелектричного охолоджувача

Конструкція інфрачервоного діодного сенсора на основі легованого індієм PbTe та багатокаскадного термоелектричного кріогенного термоелектричного охолоджувача необхідного для забезпечення температурних режимів роботи сенсора розглянута в [17]. Схематично багато каскадний охолоджувач представлено на рис. 6. Він складається з чотирикаскадного звичайного термоелектричного охолоджувача на основі Bi_2Te_3 і забезпечує температуру 200 К при температурі гарячої сторони 300 К [18].

І одноватного двокаскадного кріогенного модуля спеціальної конструкції з компенсацією термічних деформацій, що дає можливість охолодити ІЧ сенсор до температури 160 К. Кріогенний модуль складається з першого каскаду розміром 20 х 1,8 мм 4 пари і другого каскаду з однієї пари розміром 6 х 1,8 мм. Надалі тепло знімається чотирма каскадами 12, 28, 64, 126 термоелектричних пар.

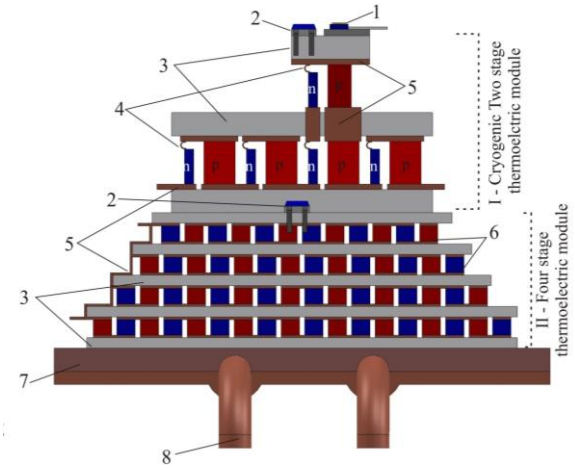


Рис. 6. Конструкція багатокаскадного термоелектричного кріогенного охолоджувача: 1 - охолоджуваний IR фотодіод, 2 – платинові терморезистори, 3 – BeO_2 кераміка, 4 – стрічка із мідної фольги, 5 – мідні шини, 6 – p-n вітки багатокаскадного термоелемента, 7 - радіатор, 8 - теплова трубка [19].

Загальна потужність, що виділяється на гарячій стороні не перевищує 100 Вт, на яку і розраховується радіатор повітряного або водяного охолодження.

При проектуванні систем керування багатокаскадними модулями, слід враховувати взаємозв'язок між каскадами, так як ефективність термоелементу залежить не тільки від підведеної потужності, а також від температур протилежного спаю та ефективності відводу тепла від нього. Тому необхідно попередньо передбачити додатковий зворотний зв'язок та алгоритм корекції роботи системи керування із врахуванням температур протилежної сторони термоелемента, ефективний алгоритм керування, а також запас потужності систем охолодження.

З огляду на зазначені особливості була розроблена структурна схема системи керування кріогенним термоелектричним охолоджувачем для забезпечення роботи ІЧ сенсора (рис. 7).

Так як цифровий регулятор обробляє дискретні значення, то на точність регулювання істотно впливає роздільна здатність вимірювання температури. Для забезпечення високої точності в якості датчика температури застосована мостова схема як і для термостата (рис. 3), але встановлено окремі давачі температури PT1000 як для холодної сторони кріогенного модуля, так і звичайного, відповідно АЦП замінено на чотириканальний MCP3424.

Модуль плавного управління потужністю чотирикаскадного термоелектричного охолоджувача реалізований за схемою DC-DC перетворювача напруги, аналогічно як і для термостата. Така реалізація забезпечує плавний безударний режим регулювання при широкому діапазоні вхідних напруг і високому ККД перетворювача, що дозволяє в сталому режимі подавати на термоелемент невелику потужність з мінімальними втратами на силових

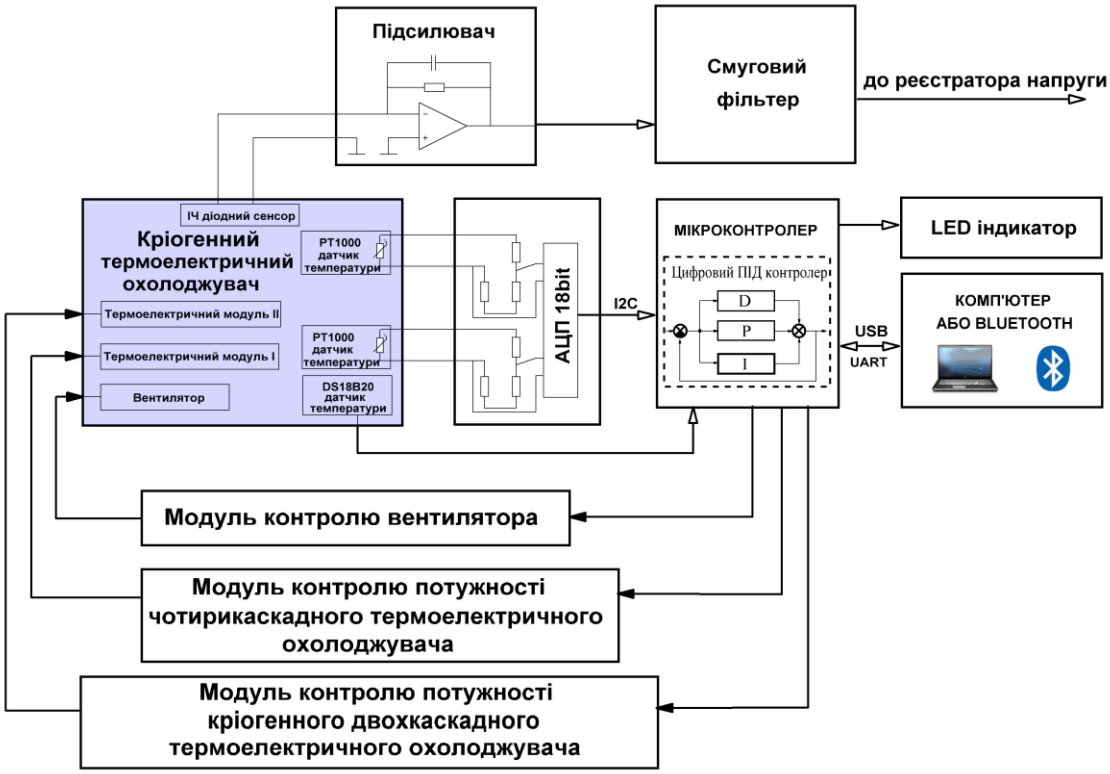


Рис. 7. Блок-схема спеціалізованої комп'ютерної системи керування термоелектричним охолоджувачем для забезпечення роботи ІЧ сенсора.

елементах схеми, що сприяє максимальному терміну експлуатації.

Модуль плавного управління потужністю кріогенного двокаскадного термоелектричного охолоджувача реалізований за схемою стабілізатора струму на польовому транзисторі і операційному підсилювачі, що дає можливість плавно змінювати потужність.

Передбачено як автономний режим роботи, так і можливість підключення до комп'ютера для зручного налаштування та моніторингу роботи.

Висновки

1. Розроблена ефективна електрична схема та алгоритм роботи, а також сконструйовано діючий зразок термоелектричного прецизійного термостата з можливістю автономної роботи, неперервного моніторингу та запису журналу температури за допомогою комп'ютера чи смартфона. Показано, що розроблений алгоритм забезпечує ефективне безударне керування і точність підтримання температури 0,03 ºС, при споживаній потужності 3 - 7 Вт.

2. Розроблена конструкція та спеціалізована комп'ютерна система керування багатокаскадним кріогенним термоелектричним охолоджувачем.

Дзундза Б.С. – к.ф.-м.н., старший науковий співробітник, докторант;
Костюк О.Б. – к.ф.-м.н., науковий співробітник;
Дашевський З.М. – професор, д.ф.-м.н.

[1] D.M. Freik, L.I. Nykyruy, O.S. Krynytskiy, Physics and Chemistry of Solid State 13(2), 297 (2012).
[2] M. Maksymuk, T. Parashchuk, B. Dzundza, L. Nykyruy, L. Chernyak, Z. Dashevsky, Mater. Today Energy, 21, 100753 (2021) (https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100753).
[3] J. Mao, H. Zhu, Z. Ding. Z. Liu, G.A. Gamage, G. Chen, Z. Ren Scince 365, 495 (2019) (https://doi.org/10.1126/science.aax7792).
[4] N. Sidorenko, T. Parashchuk, M. Maksymuk, Z. Dashevsky, Cryogenics, 112, 103197 (2020) (https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103197).
[5] T. Parashchuk, O. Kostyuk, L. Nykyruy, Z. Dashevsky, Mater. Chem. Phys. 253, 123427 (2020) (https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123427).
[6] B. Dzundza, L. Nykyruy, T. Parashchuk, E. Ivakin, Y. Yavorsky, L. Chernyak, Z. Dashevsky, Physica B: Condens., 588 (2020) (https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412178).
[7] J. Gradauskas, B. Dzundza, L. Chernyak, Z. Dashevsky, Physica B: Condensed Matter 607, 412855 (2021) (https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412855).

[8] J.R. Sootsman, D.Y. Chung, and M.G. Kanatzidis, Angew. Chem. Int. Ed. 48, 8616 (2009) (https://doi.org/10.1002/anie.200900598).
[9] A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Y. Khoverko, I. Kogut, V. Golota, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29(10), 8364 (2018) (https://doi.org/10.1007/s10854-018-8847-0).
[10] A. Druzhinin, I. Kogut, Y. Khoverko, N. Kucherepa, MEMSTECH 2020 - Proceedings 90, 9109479 (2020).
[11] K.T. Wojciechowski, T. Parashchuk, B. Wiendlocha, O. Cherniushok, and Z. Dashevsky, J. Mater. Chem. C, 8, 13270 (2020) (https://doi.org/10.1039/D0TC03067H).
[12] T. Parashchuk, I. Horichok, A. Kosonowski, O. Cherniushok, P. Wyzga, G. Cempura, A. Kruk, K.T. Wojciechowski, J. Alloys Compd. 860, 158355 (2021) (https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158355).
[13] M.A. Ruvinskii, O.B. Kostyuk, B.S. Dzundza, I.P. Yaremiy, M.L. Mokhnatskyi, Ya.S. Yavorskyy, Journal of Nano- and Electronic Physics 9(5), 05004-1-05004-6 (2017) (https://doi.org/10.21272/jnep.9(5).05004).
[14] D. Mocatta, G. Cohen, J. Schattner, O. Millo, E. Rabani, U. Banin, Science 332, 77 (2011) (https://doi.org/10.1126/science.1196321).
[15] A. Rogalski, Prog. Quantum Electron. 27, 59 (2003).
[16] D. Kozhanov, T. Story, Int. J. Mod. Phys. B 16, 2022 (2012).
[17] J. Gradauskas, B. Dzundza, L. Chernyak, Z. Dashevsky, Sensors 21(4), 1195 (2021) (https://doi.org/10.3390/s21041195).
[18] G. Krizman, B.A. Assaf, G. Bauer, G. Springholz, R. Ferreira, G. Bastard, L.-A. de Vaulchier, Y. Guldner, 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 1 (2019) (https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8873784).
[19] T. Parashchuk, N. Sidorenko, L. Ivantsov, A. Sorokin, M. Maksymuk, B. Dzundza, Z. Dashevsky, Development of a solid-state multi-stage thermoelectric cooler, J. Power Sources, 496, 229821 (2021) (https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229821).

B.S. Dzundza[1,2], O.B. Kostyuk[2,3], Z.M. Dashevsky[4]

Features of Computer Control Systems Designing for Precision Thermoelectric Coolers

[1]*Lviv Polytechnic National University, Lviv Ukraine, bohdan.dzundza@pnu.edu.ua*
[2]*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine*
[3]*Ivano-Frankivsk National Medical University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, oksanakostuk@gmail.com*
[4]*Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel, dashevsky.45@mail.ru*

The effective electrical scheme, the operating algorithm, as well as the working sample of a thermoelectric precision thermostat have been developed offering the possibility of autonomous operation, continuous monitoring, and recording of the temperature using a computer or smartphone. It is shown that the developed algorithm provides effective shockless control and accuracy of maintaining the temperature of 0.03 °C, with a power consumption of 3-7 W. A design and a specialized numerical control system for a multistage cryogenic thermoelectric cooler have been developed.

Keywords: thermoelectric thermostat, temperature regulator, computer system.