

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 536. 532

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ ПЕЛЬТЬЄ

© Віктор Лозбін¹, Володимир Столярчук², Андрій Гук³, 2005¹Люблінська політехніка,

вул. Надбистжицька, 38А, 20618, Люблін, Польща

²Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,

вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна.

³ТзОВ “Медіа-Вест”, вул.Римлянина 1, 79008, Львів, Україна

Розроблено і проаналізовано метод визначення фізичних властивостей термопар з використанням ефекту Пельтьє. Запропоновано використання комп'ютера в складі лабораторного місця для дослідження параметрів термоелектричних перетворювачів.

Сделан анализ и предложен метод определения физических свойств термопар с использованием эффекта Пельтье. Предложено использование компьютера в составе лабораторного места для исследования параметров термоэлектрических преобразователей.

The analysis is done and the method of physical properties determination of thermocouples with the use of Peltie effect is offered. Offered computer analisis in composition with laboratory place for research parameters of thermoelectrical converters.

Вступ. Сьогодні метрологічну перевірку термоелектричних перетворювачів виконують державні метрологічні служби. Основним пунктом такої перевірки є визначення термо-ЕРС термоперетворювачів і подібних чутливих елементів при заданих значеннях температури.

Визначаючи відхилення від НСХ, користуються термостатом для термостатування вільних кінців, нагрівальними печами для задавання температури і вимірювального пристрою для реєстрації значень. Одержані значення повинні відповідати номінально-статичним характеристикам в межах допустимих відхилень [2].

Для перевірки цієї вимоги потрібно визначити термо-ЕРС чутливого елемента в декількох заданих значеннях температури робочого кінця, за умови, що температура вільних кінців дорівнює 0°C. Одержані значення порівнюють з даними стандартних градувальних таблиць.

Показник теплової інерції визначають за перехідним процесом в режимі звичайного охолодження [1].

У сучасних умовах інтенсифікації технологічних процесів в різних напрямках народного господарства, автоматизації досліджень і контролю за якістю про-

дукції, що випускається, виникає необхідність створення нових швидкодійних засобів і методів вимірювань. Це привело до появи і розвитку нового напрямку вимірювальної техніки, який одержав назву “динамічні вимірювання”. До динамічних належать вимірювання величин, що змінюються в часі, і вимірювання постійних величин динамічними методами [4].

З появою “динамічних вимірювань” з'являється можливість перевірки параметрів термопар під час їх роботи без демонтажу, що має велике практичне значення. Розробці відповідних методів приділяється багато уваги. Серед них є відомий метод визначення характеристик термопари за допомогою ефекту Пельтьє, під час якого необхідно пропускати струм через злоти термопари.

Для розв'язання поставлених задач виникає необхідність в створенні робочого лабораторного місця, яке б дало можливість досліджувати статичні і динамічні характеристики перетворювачів температури (це можуть бути як класичні перетворювачі: термометри опору або термоелектричні перетворювачі, так і інші перетворювачі температури).

Таке місце потрібно обладнати електричною піччю і нуль-термостатом для задавання температури. Для під'єднання джерела струму і сигналу з термоперетворювача потрібен комутатор, далі за допомогою хорошого аналогово-цифрового перетворювача сигнал буде реєструватися комп'ютером. Для керування реєстрацією і обробкою даних потрібне програмне забезпечення. Схематично таке лабораторне місце подано на рис. 1.

За кривою нагрівання або вистигання можна робити висновок про статичні, динамічні характеристики термоперетворювача. Одержані результати можна представляти, маючи певне програмне забезпечення, у вигляді повного метрологічного аналізу.

На такому лабораторному місці можна впроваджувати також метод перевірки, що базується на порівнянні із показами зразкового перетворювача температури.

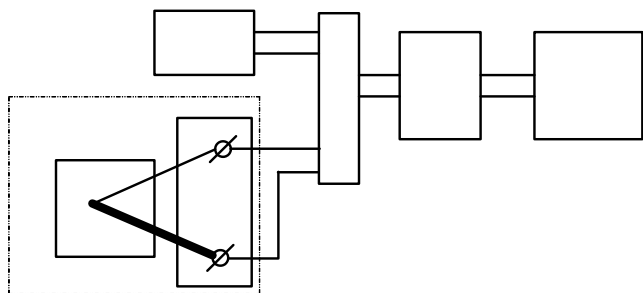


Рис. 1. Схематичне подання лабораторного місця для визначення НСХ термоперетворювачів

Обґрунтування теплових процесів в термопарі. Одним із методів перевірки термопар під час їх роботи без демонтажу є метод з використанням ефекту Пельтьє. Суть останнього полягає в тому, що через з'єднання термопар пропускають імпульс струму, який через тепло Пельтьє збільшує або зменшує температуру з'єднання. Під час проходження сталого струму I через з'єднання утворюється тепло Пельтьє:

$$Q_{\pi} = I \cdot \alpha \cdot T_3 \cdot t_0, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт термо-ЕРС; t_0 – час проходження струму; T_3 – температура з'єднання.

Ефект Пельтьє можна пояснити так. Якщо носії струму (електрони), пройшовши через з'єднання, потрапляють в ділянку з меншою енергією, вони передають надлишок енергії кристалічній ґратці, в результаті чого поблизу контакту і в самому контакті виділяється тепло Пельтьє:

$$Q_{\pi} \geq 0. \quad (2)$$

Температура контакту підвищується.

І навпаки, при переході в область з більшою енергією електрони позичають енергію від ґратки, поглинається тепло Пельтьє:

$$Q_{\pi} \leq 0. \quad (3)$$

Температура контакту знижується.

Якщо припустити, що початкова температура дротів термопар є сталою, то в результаті проходження струму I термопара нагрівається в зоні контакту до температури T_3 як за рахунок виділення певної кількості тепла Пельтьє, так і за рахунок тепла Джоуля. Виділення останнього відбувається в будь-якій точці термопар.

Виділення тепла Джоуля приводить до рівномірного підвищення температури так, що підвищення температури за рахунок тепла Пельтьє може бути відраховане від цього рівня.

Аналіз показує, що при збільшенні тривалості імпульсу t_0 , а особливо густини струму основну перешкоду для досліджень створює тепло Джоуля і необхідно шукати способи виключення цієї складової. Якщо прийняти, що властивості обох матеріалів термопар однакові (крім α), то виділення тепла Джоуля в зоні контакту становить

$$q_j = \frac{j^2 \cdot \rho \cdot t}{c \cdot \gamma}, \quad (4)$$

де j – густина струму; ρ – питомий опір.

Одним із методів є пропускання струму через з'єднання термопар в обох напрямках з одночасним вимірюванням спадів напруги E . При пропусканні струму в прямому напрямку відбувається підвищення температури з'єднання, при пропусканні в зворотному – зменшення. Різниця виміряних значень становитиме:

$$\Delta E = E^+ - E^- = \alpha(T^+ - T^-) \quad (5)$$

Наступна проблема. Якщо вздовж дроту (в нашому випадку термопар), по якому тече струм, існує перепад температури, причому напрямок струму відповідає руху електронів від гарячого кінця до холоднішого, тоді, переходячи з гарячішого перерізу в холодніший, електрони передають надлишкову енергію навколишнім атомам, чим викликають нагрівання провідника (виділення тепла). При зворотному напрямку струму електрони, проходячи з холоднішої ділянки в гарячішу, поповнюють свою енергію за рахунок навколишніх атомів (поглинання тепла). Цим поясню-

ється в першому наближенні явище Томсона. Потрібно врахувати також, що в першому випадку електрони гальмуються, а в другому – прискорюються полем термо-ЕРС, що змінює значення коефіцієнта Томсона, а інколи приводить навіть до зміни його знаку. Закон можна виразити формулою:

$$Q_{\tau} = \tau \cdot \Delta T \cdot I \cdot t, \quad (6)$$

де τ – коефіцієнт Томсона.

Щоб виключити вплив ефекту Томсона, найпростіше було б виконувати вимірювання в однорідному середовищі, коли обидва кінці термопари знаходилися б за однакової температури, а фізичні властивості термоелектродів є однорідними за довжиною та поперечним перерізом.

Усі вищеперераховані процеси в термопарі під час проходження струму зображено на рис. 2 і рис. 3. Для прикладу розглянуто термопару хромель-алюмель $CrAl$, у якої додатним електродом є Cr , а від'ємним Al .

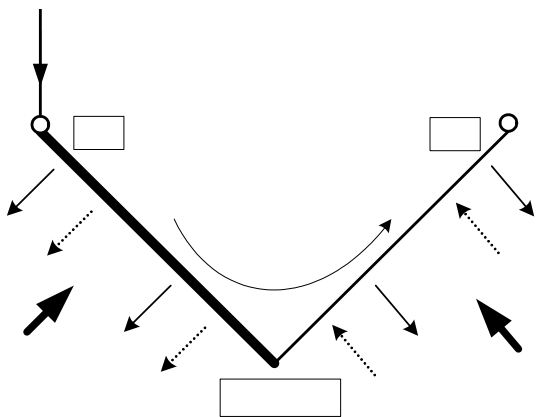


Рис. 2. Випадок перший: додатний напрямок протікання струму

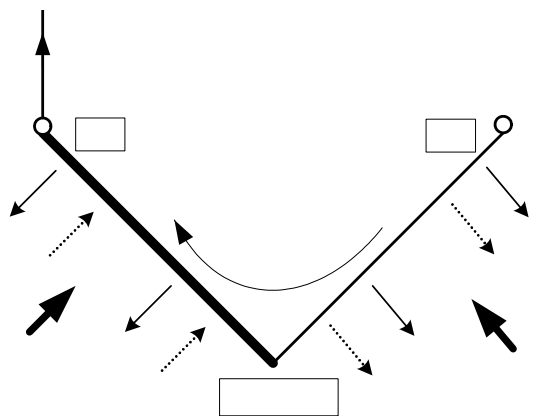


Рис. 3. Другий випадок: від'ємний напрямок протікання струму

З рис. 2 (додатний напрямок протікання струму) видно, що в додатному електроді виділяється як тепло Джоуля, так і тепло Томсона. У від'ємному електроді тепло Джоуля виділяється, а тепло Томсона поглинається. В з'юті відбувається нагрівання – виділяється тепло Пельтьє.

З рис. 3 (від'ємний напрямок протікання струму) видно, що в додатному електроді тепло Джоуля виділяється, а тепло Томсона поглинається. У від'ємному електроді тепло Джоуля і тепло Томсона виділяється. В з'юті відбувається охолодження – поглинається тепло Пельтьє.

Для математичного моделювання таких процесів можна використовувати рівняння:

$$fc\gamma \frac{dt}{d\tau} = \frac{d}{dx} \left(\lambda f \frac{dt}{dx} \right) + j^2 \rho f - P\varepsilon\delta (t^4 - t_s^4) - Pk(t - t_s) + jt \frac{d\alpha}{dx} f, \quad (7)$$

де

$$f = f(x) = \frac{\pi d^2(x)}{4},$$

$d(x)$ – діаметр дроту, спаю; P – периметр, $P(x) = \pi d(x)$; t – температура, (K); τ – час; t_s – температура довкілля; k – коефіцієнт тепловіддачі; ε – ступінь чорноти ($\varepsilon = 0,7$); δ – стала Больцмана; λ – коефіцієнт теплопровідності; c – питома теплоємність; γ – густина; ρ – питомий опір.

Враховано, що термопара складається з двох матеріалів ($Cr - Al$), а з'юст є сплавом з перехідною концентрацією від 0 до 100 % кожного компонента.

Передбачено, що з'юст має форму кулі діаметром, більшим від діаметра електродів. Як показали розрахунки, вплив його невеликий.

Рівняння було розв'язано числовими методами.

Порівняння експериментальних і розрахункових даних показує їх збіг.

Очевидно, треба працювати при менших струмах, не допускаючи значних перегрівів. Фонова напруга стає дуже значною, по-друге при таких перегріваннях зростає вплив нелінійностей в процесах теплообміну та істотна зміна властивостей (λ, ρ, c). Розрахунки показують, що максимальний струм для виконання експерименту не повинен перевищувати **2А** на **1 мм²** перерізу дроту.

Розрахунок. Виконано розрахунки нагріву для термопари: (*Cr – Al*) а) $E = 1,0$ – нової; б) $E = 0,9$ – деградованої на 10% ; в) $E = 0$. Варіант $E = 0$ означає, що на місце термопари в електричне коло ввімкнено дріт хромелю, фізичні властивості якого відповідають властивостям хромелевого термоелектрода термопари. Варіант $E = 0$ використовується для порівняння теплофізичних властивостей термопари (*Cr – Al*) залежно від напрямку пропускання струму.

Прийнято, що температура довкілля становить 20°C , довжина термоелектродів (кожного) 100 мм, діаметр дротів 0,3 мм. Струм пропускання: +1000 мА, –1000 мА. Час пропускання до 1000 с.

Результати розрахунків наведені в табл. 1, 2, 3, 4.

В табл.1 результати для $E = 0$; $E = 0,9$; $E = 1,0$ при додатному напрямку проходження струму: де $(t_n - t_s)$ – збільшення температури злуту над температурою довкілля, графік на рис. 4, а; $(U_T \cdot 1000)$ – спадок напруги на термопарі, рис. 5, а; $(R_T \cdot 1000)$ – опір термопари, рис. 6, а.

В табл. 2 ідентичні дані для від’ємного напрямку проходження струму. Відповідно графіки на рис. (4, б, 5, б, 6, б).

В табл. 3 і табл. 4 наведено дані розігріву термопари відповідно додатним і від’ємним струмом з моменту його від’єднання. Відповідно графіки за цими даними зображені на рис. 7, 8, 9.

Таблиця 1

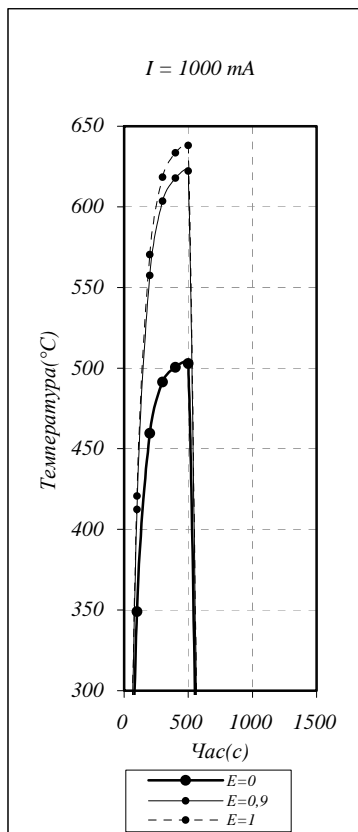
I = 1000 мА (додатний напрямок)

Вісь X: час (с)	Вісь Y: E = 0			Вісь Y: E = 0,9			Вісь Y: E = 1,0		
	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	349,11	1801,48	1801,488	412,44	1827,25	1811,228	420,62	1830,6	1812,449
200	459,55	1871,2	1871,206	557,53	1908,91	1887,374	570,43	1913,92	1889,448
300	491,46	1888,86	1888,862	603,54	1931,65	1908,377	618,46	1937,39	1910,906
400	500,43	1893,67	1893,674	617,82	1938,49	1914,676	633,46	1944,53	1917,417
500	502,96	1895,01	1895,012	622,2	1940,58	1916,604	638,14	1946,75	1919,436
600	112,6	0	1551,048	126,9	5,33	1561,577	128,87	6	1563,012
700	22,32	0	1455,62	24,88	1,63	1458,067	25,22	1,83	1458,402
800	4,26	0	1436,117	4,73	0,91	1436,6	4,8	1,02	1436,669
900	0,81	0	1432,396	0,88	0,77	1432,488	0,89	0,86	1432,499
1000	0,15	0	1431,698	0,17	0,75	1431,713	0,16	0,83	1431,714

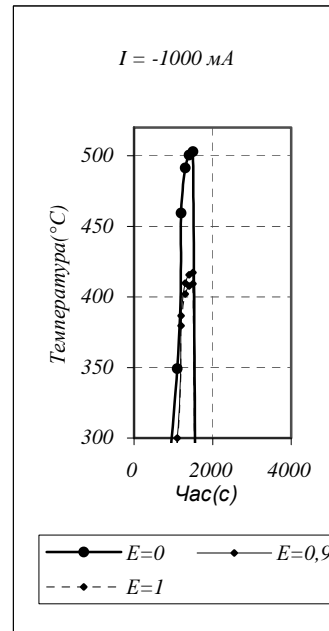
Таблиця 2

I = – 1000 мА (від’ємний напрямок)

Вісь X: час (с)	Вісь Y: E = 0			Вісь Y: E = 0,9			Вісь Y: E = 1,0		
	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1100	349,11	-1801,49	1801,488	299,98	-1781,83	1793,599	295,21	-1779,94	1792,817
1200	459,55	-1871,21	1871,206	386,54	-1843,51	1858,552	379,6	-1840,9	1857,32
1300	491,46	-1888,87	1888,862	409,77	-1858,05	1873,969	402,07	-1855,16	1872,528
1400	500,43	-1893,68	1893,674	415,7	-1861,7	1877,847	407,81	-1858,74	1876,346
1500	502,96	-1895,02	1895,012	417,2	-1862,65	1878,846	409,34	-1859,65	1877,319
1600	112,6	0	1551,048	102,75	4,44	1543,731	101,84	4,9	1543,068
1700	22,32	0	1455,62	20,56	1,48	1453,938	20,41	1,63	1453,786
1800	4,26	0	1436,117	3,94	0,88	1435,787	3,92	0,98	1435,763
1900	0,81	0	1432,396	0,73	0,77	1432,331	0,73	0,86	1432,327
2000	0,15	0	1431,698	0,15	0,75	1431,687	0,14	0,83	1431,687

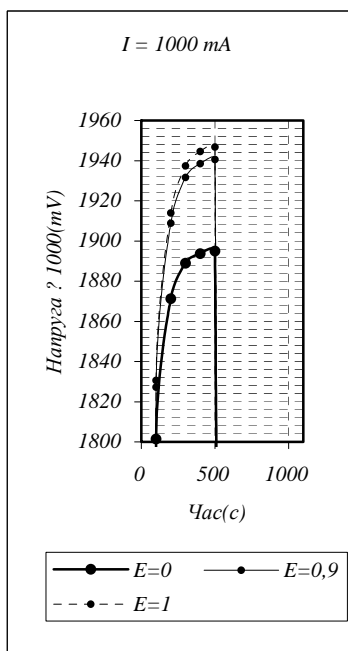


а

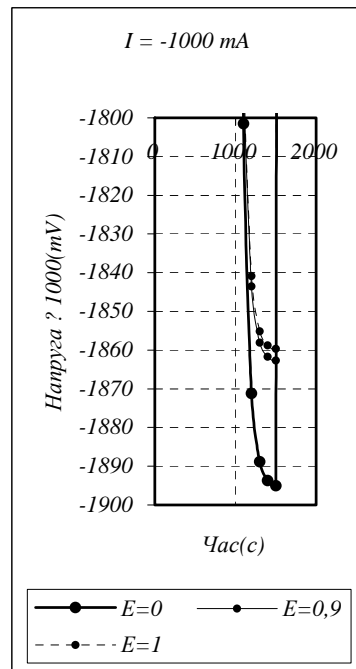


б

Рис. 4. Перевищення температури злуту над температурою довкілля



а



б

Рис. 5. Спад напруги на термопарі

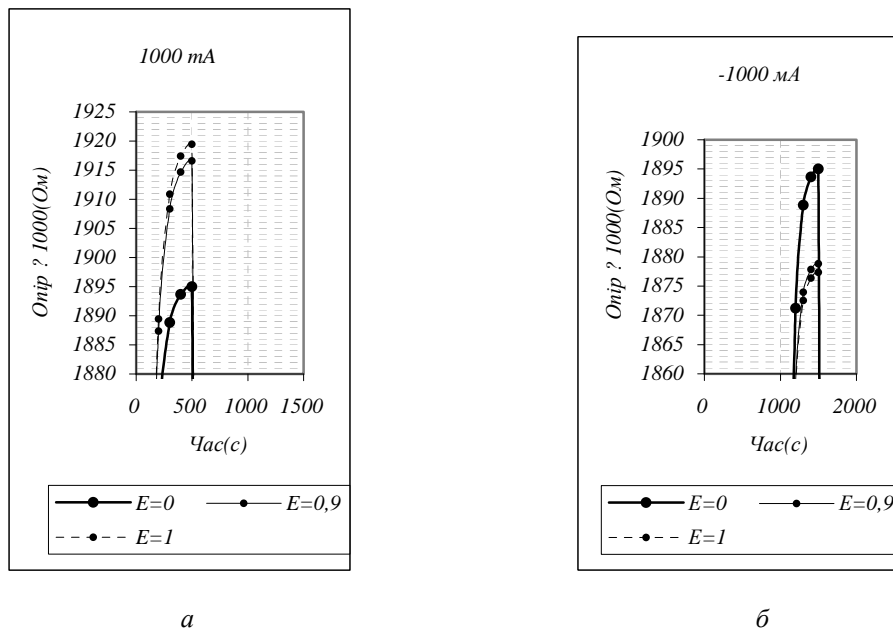


Рис. 6. Опір термопару

Для вивчення впливу часу пропускання струму через термопару виконали обчислювальний експеримент, а одержані результати подані в табл. 3, та 4 і на рис. 7, 8, 9.

Таблиця 3

I = 1000 mA. Струм від'єднується в один момент часу: 600 с

Вісь X: час, с	Вісь Y: E = 0			Вісь Y: E = 0,9			Вісь Y: E = 1,0		
	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)
600	112,6	0	1551,048	126,9	5,33	1561,577	128,87	6,0	1563,012
700	22,32	0	1455,62	24,88	1,63	1458,067	25,22	1,83	1458,402
800	4,26	0	1436,117	4,73	0,91	1436,6	4,8	1,02	1436,669
900	0,81	0	1432,396	0,88	0,77	1432,488	0,89	0,86	1432,499
1000	0,15	0	1431,698	0,17	0,75	1431,713	0,16	0,83	1431,714

Таблиця 4

I = - 1000 mA. Струм від'єднується в один момент часу: 1600 с

Вісь X: час, с	Вісь Y: E = 0			Вісь Y: E = 0,9			Вісь Y: E = 1,0		
	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)	$t_n - t_s$ (°C)	$U_T \cdot 1000$ (mV)	$R_T \cdot 1000$ (Om)
1600	112,6	0	1551,048	102,75	4,44	1543,731	101,84	4,9	1543,068
1700	22,32	0	1455,62	20,56	1,48	1453,938	20,41	1,63	1453,786
1800	4,26	0	1436,117	3,94	0,88	1435,787	3,92	0,98	1435,763
1900	0,81	0	1432,396	0,73	0,77	1432,331	0,73	0,86	1432,327
2000	0,15	0	1431,698	0,15	0,75	1431,687	0,14	0,83	1431,687

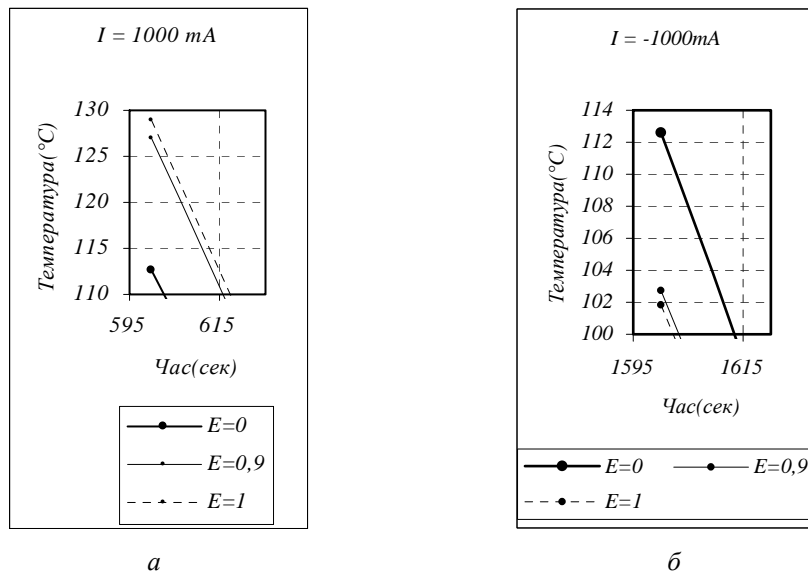


Рис. 7. Температура злиту без струму

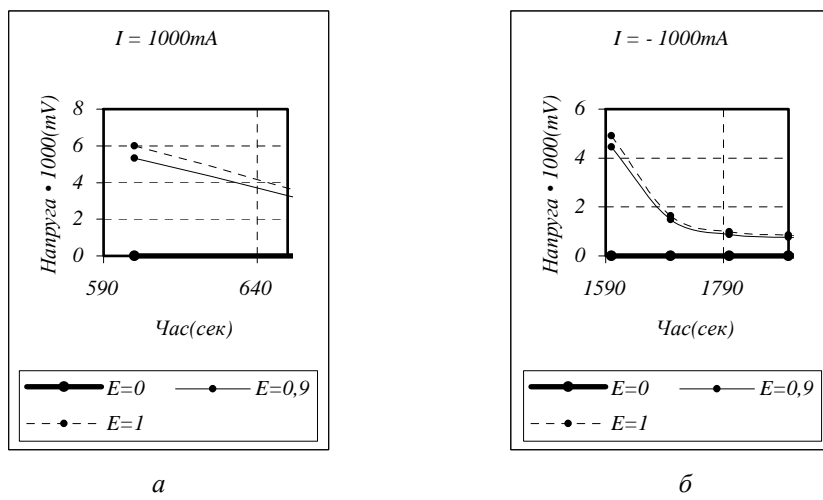


Рис. 8. Напряга на термопарі без струму

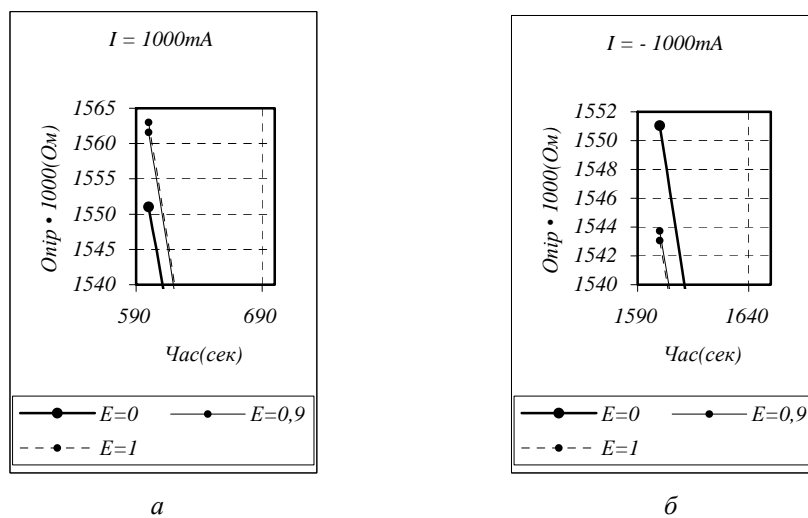


Рис. 9. Опір термопарі без струму

Отже, як видно з графіків, при додатному напрямку протікання струму:

- а) в результаті виділення тепла злут розігрівається;
- б) температура злуту збільшується.

При від'ємному напрямку протікання струму:

- а) тепло в злуті відбирається;
- б) температура зменшується.

Впливом ефекту Томсона на вихідний сигнал термоелектричного перетворювача можна знехтувати,

оскільки градієнт температури по довжині термоелектричних дрітів малий. Незначні градієнти температури є в місцях злуту термопари і у місцях контакту холодних кінців.

Експеримент. За наведеною методикою було виконано експерименти, для термопари ($Cr - Al$) діаметром $0,3\text{ мм}$. Струм пропускання становив 400 мА (рис. 10), 600 мА (рис. 11) в додатному і у від'ємному напрямках.

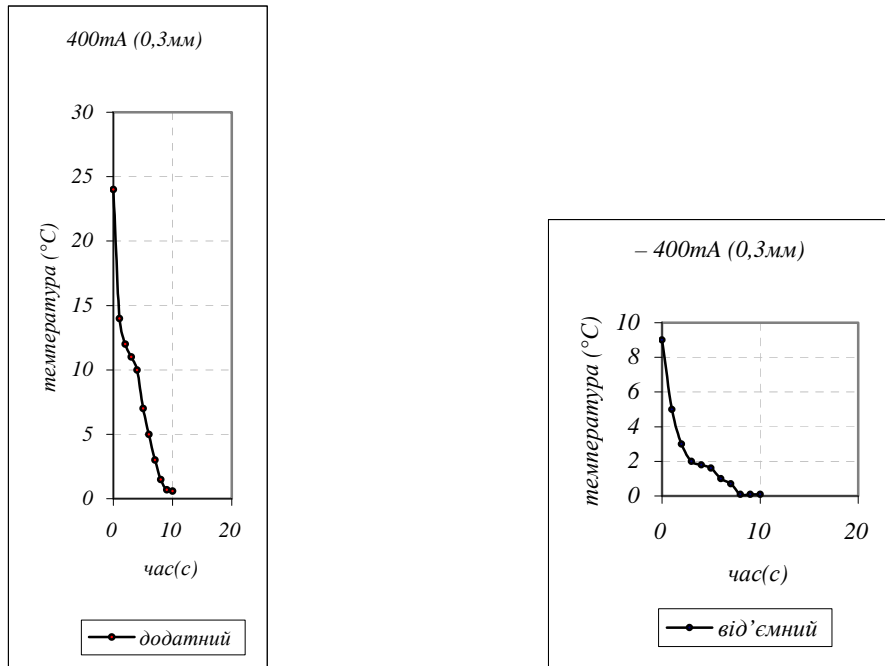


Рис. 10. Температура розігріву термопари після вимкнення струму 400 мА

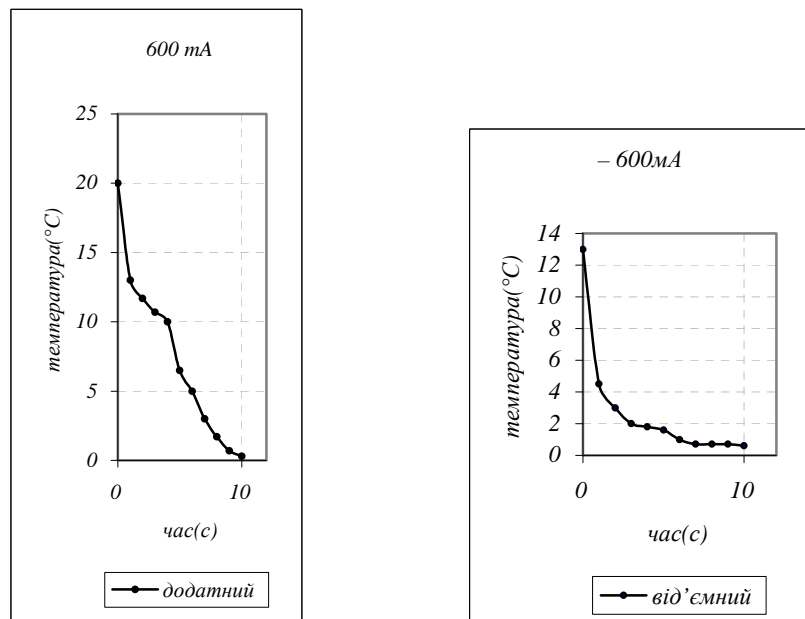


Рис. 11. Температура розігріву термопари після вимкнення струму 600 мА

Якщо порівняти експериментальні графіки на рис. 10, 11 із розрахунковими графіками на рис. 7, то можна побачити підтвердження тому, що метод із застосуванням ефекту Пельтьє доцільно застосовувати для визначення фізичних параметрів термоелектричних перетворювачів.

Одержані експериментальні результати рис. 10, 11 показують, що при струмі 400 мА (додатний напрямок), температура нагрівання з'єднаної становить більше значення 24 °С, порівняно з нагріванням струмом 600 мА (додатний напрямок) 20 °С, а при пропусканні в зворотному напрямку одержані результати є зворотними і, на перший погляд, логічними (9 °С і 13 °С).

Одержана різниця в зареєстрованій термоелектро-рушійній силі при пропусканні струму в додатному і в від'ємному напрямках може бути пояснена зміною умов теплообміну між нагрітою частиною термоелектродів і з'єднаною, а також довкілля.

Розв'язання задачі. Усі вищеописані перехідні процеси, що відбуваються в термопарі після вимкнення струму, тривають мілісекунди. Тому виконати їх реєстрацію доступними засобами вимірювання практично неможливо. Потрібен прилад, який з високою точністю міг би реєструвати такий перехідний процес.

Із розглянутих пропозицій ринку було вибрано 32-канальну 16-розрядну багатофункційну плату-адаптер збору даних з високою роздільною здатністю із серії ADLINK PCI-9114 (рис. 12), за допомогою якої можна відстежувати електричний сигнал до 20 мкВ.

Призначення та засоби розробки програми введення та відображення даних для плати ADLINK PCI-9114A. Для введення та відображення даних за допомогою плати ADLINK PCI-9114 своїми силами було розроблено програму DUMPER.

Програма DUMPER призначена для введення та відображення даних аналого-цифрового перетворення сигналу (DA) з плат ADLINK, які підтримуються бібліотекою розробника PCIS-DASK. PCIS-DASK – бібліотека інтерфейсних функцій для розробки програм введення та аналізу сигналів від ADLINK. Вона містить високошвидкісний драйвер для розробки користувацьких програм в середовищі MS Windows NT (2000, XP).

PCIS-DASK поставляється у вигляді бібліотеки динамічного завантаження (.dll) і заголовків для використання в продуктах, розроблених за допомогою мов програмування C і C++. Для програми DUMPER застосовувався пакет Microsoft Visual C++ .NET.

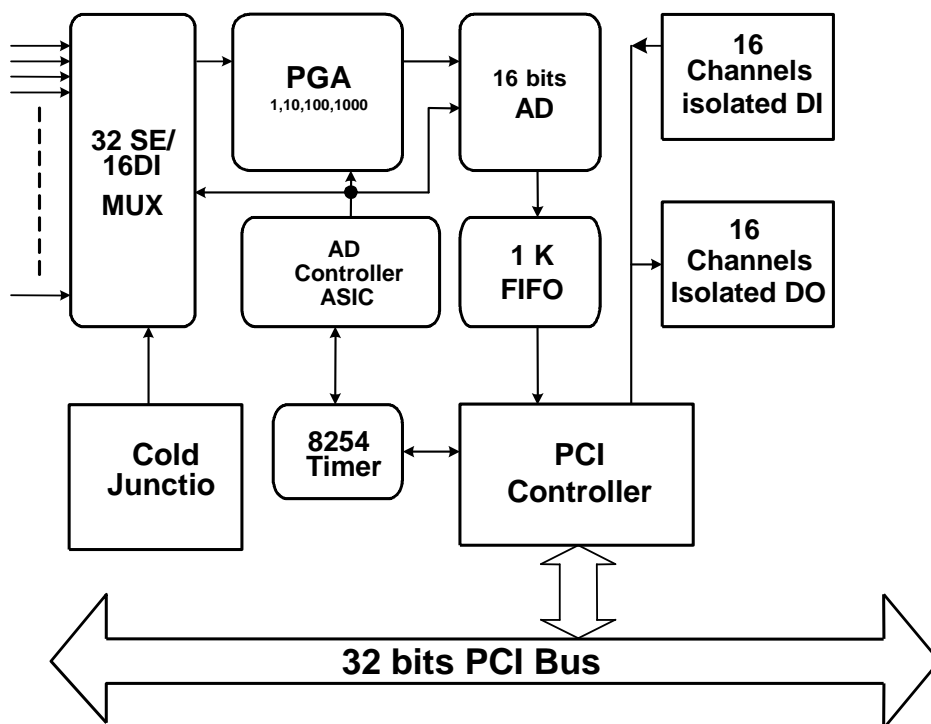


Рис. 12. Схема функціональних блоків плати АЦП: PCI-9114

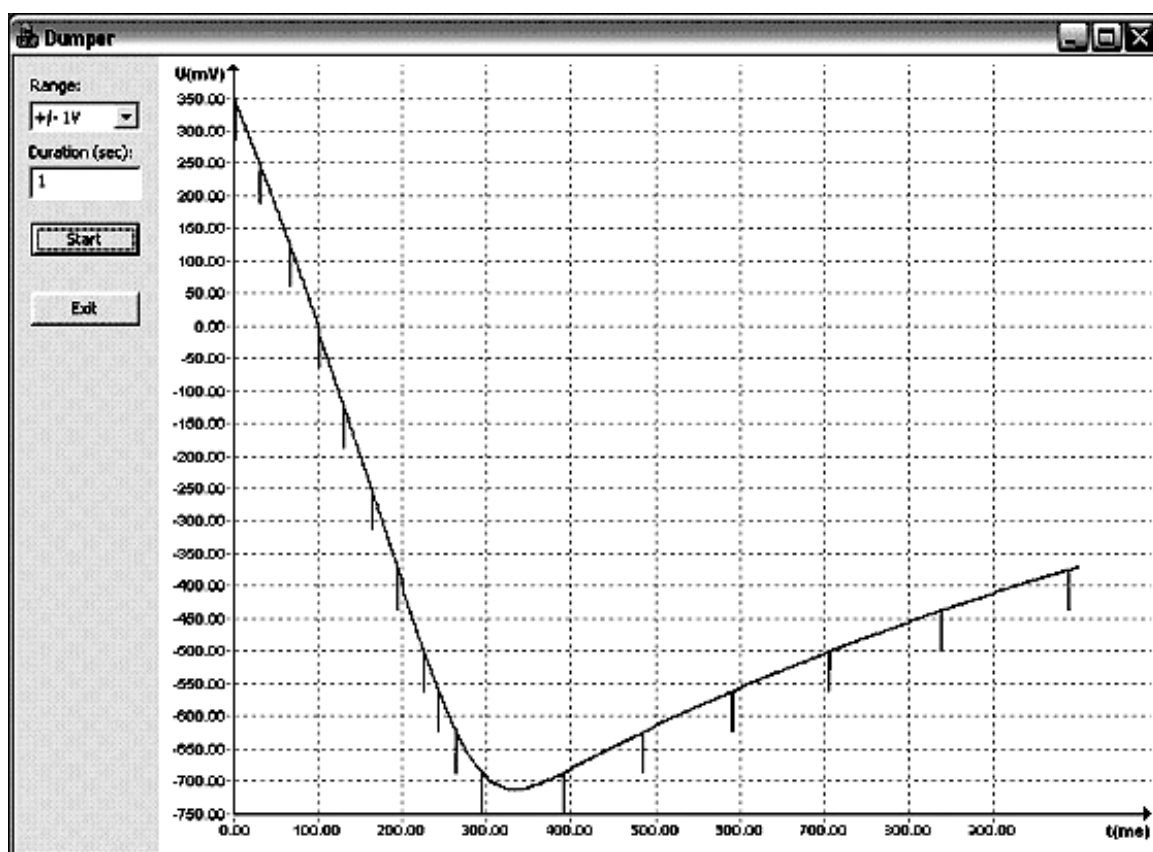


Рис. 13. Зовнішній вигляд програми DUMPER

Опис програми DUMPER. Інтерфейс програми DUMPER (рис. 13) виконаний у вигляді діалогового вікна з полями вводу “Range” – діапазон, “Duration” – період захоплення даних та графіка оцифрованого сигналу, що автоматично масштабується.

Перед початком захоплення сигналу повинен бути встановлений відповідний системний драйвер для ADLINK PCI-9114A. А/D перетворення запускається при натисненні на кнопку “Start”. Програма виконує захоплення сигналу з каналу “0” плати. Канал можна змінити в вихідних текстах програми. Для цього потрібна перекомпіляція. Перетворення відбувається при частоті дискретизації 10 кГц, яку можна змінювати програмно до 250 кГц.

При старті програми відбувається ініціалізація плати ADLINK згідно з документацією бібліотеки PCIS-DASK. Діапазон введення вибирається із стандартних значень для плати PCI-9114A: “+/- 10V”; “+/- 1V”; “+/- 100 mV”; “+/- 10 mV”.

Введення даних виконується за допомогою функції `AI_ContReadChannel`, яка у такому разі використовує буфер в оперативній пам’яті розміром 1K 32-х розрядних слів (4K байт). Функція викликається послідовно упродовж періоду захоплення (метод описаний в документації бібліотеки PCIS-DASK), і дані, що введені за допомогою неї, переносяться в буфер відображення розміром 64 Мб. Другий буфер використовується підсистемою відображення даних для побудови графіка введеного сигналу.

1. ДСТУ 2857-94(ГОСТ6616-94). Перетворювачі термоелектричні. Загальні технічні вимоги. Держстандарт України, 1999. 2. ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94). Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення. Держстандарт України, 1999р. 3. Луцик Я.Т., Буняк Л.К., Рудавський Ю.К., Стадник Б.І. Енциклопедія термометрії. Львів, 2003. 4. Стадник Б.І., Столярчук В.П. УДК 536.5(088.8). Покращання динамічного методу вимірювання температури // Вимірювальна техніка та метрологія №55. Львів, 1999.