

## ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЗМІННОГО СТРУМУ В РЕЖИМІ РІЗНОЧАСОВОГО КОМПАРУВАННЯ

*За допомогою комп'ютерного моделювання отримано розподіли потенціалу та температури у диференційному термоелектричному вимірювальному перетворювачі у режимі різночасового компарування. Розраховано похибку перетворення змінного струму. Порівняно результати моделювання з експериментально отриманими даними. Експериментальні дані задовільно підтверджують результати моделювання.*

**Ключові слова:** диференційний перетворювач змінного струму, комп'ютерне моделювання.

*Computer simulation was used to obtain potential and temperature distributions in a differential thermoelectric measuring converter in the non-simultaneous comparison mode. The error of alternating current conversion was calculated. The results of simulation were compared to the data deduced from experiments. The results of simulation were satisfactorily proved by the experimental data.*

**Key words:** differential alternating current converter, computer simulation.

### Вступ

Точність і надійність сучасних еталонів, електровимірювальних приладів та установок для визначення ефективного (дієвого) значення змінного струму, напруги, потужності і коефіцієнта потужності в широкому діапазоні частот значною мірою залежить від параметрів і характеристик вимірювальних перетворювачів, що лежать в основі побудови цих приладів.

З практики міжнародних порівнянь еталонів змінного струму відомо, що сучасні вимоги до точності вимірювання змінного струму напруги і потужності в широкому діапазоні частот можна забезпечити, використовуючи методи термоелектричного компарування з постійним струмом. Тому метрологічні центри багатьох країн ведуть інтенсивні розробки нових термоелектричних засобів вимірювання і засобів їхнього метрологічного забезпечення з використанням термоелектричного компарування [1 – 3].

Основним елементом термоелектричного методу вимірювання напруги та потужності змінного струму є вимірювальний термоперетворювач, у якому енергія вимірюваного струму перетворюється в теплову, що виділяється в резистивному нагрівнику і знову перетворюється в електричну за допомогою термоелемента. У разі відомих співвідношень між величиною змінного струму і термоЕРС термоелемента можна вимірювати змінні струми апаратурою постійного струму [4].

Для підвищення точності перетворення в сучасній метрології змінного струму набули поширення перетворювачі на основі термобатарей [5, 6]. У таких термоперетворювачах

нагрівач має тепловий контакт зі спаями великого числа термопар (50 – 120 шт.), які послідовно з'єднані в батарею. Використання термопарейних перетворювачів дає можливість значно підвищити точність перетворення струму (за рахунок зменшення впливу ефекту Томсона), зменшити робочу температуру нагрівача і, отже, зменшити вплив температурних коефіцієнтів параметрів матеріалів нагрівача й термопар на квадратичність вольтамперної характеристики й підвищити здатність до перевантаження.

Перетворювачі на основі термопарей виготовляються за тонкоплівковою технологією. Низька ефективність плівкових термопар обумовлює необхідність використання великої їх кількості, що призводить до зростання опору термопарей до декількох десятків кОм і збільшення шумів, а також до збільшення величини електричної ємності між нагрівачем і термопарою, яка обмежує високочастотний діапазон їх застосування.

Вищевказаних недоліків позбавлені диференційні термоелектричні перетворювачі (ДТП). ДТП призначені для приладів одночасного порівняння при створенні еталонних і зразкових засобів метрологічного забезпечення передачі інформації про розміри електричних одиниць вимірювання від державних еталонів робочим еталонам і мірам змінної напруги та струму, аналоговим і цифровим вимірювальним приладам. Проте є випадки використання ДТП у режимі різночасового компарування [7]. Істотні використання комп'ютерних методів проектування трапляються досить рідко. Особливо цікавим є комп'ютерне моделювання при використанні диференційних перетворювачів у нестационарних режимах роботи.

*Мета* роботи – розробка комп'ютерного методу дослідження перетворювачів і реалізація цього методу на ДТП, що працюють в особливих режимах.

*Об'єктом* дослідження є розроблений в Інституті термоелектрики диференційний термоелектричний перетворювач ДТПТ-6.

*Предметом* дослідження є розподіли температури та електричного потенціалу у нагрівниках і вітках термопар.

### Фізична модель диференційного термоелектричного вимірювального перетворювача

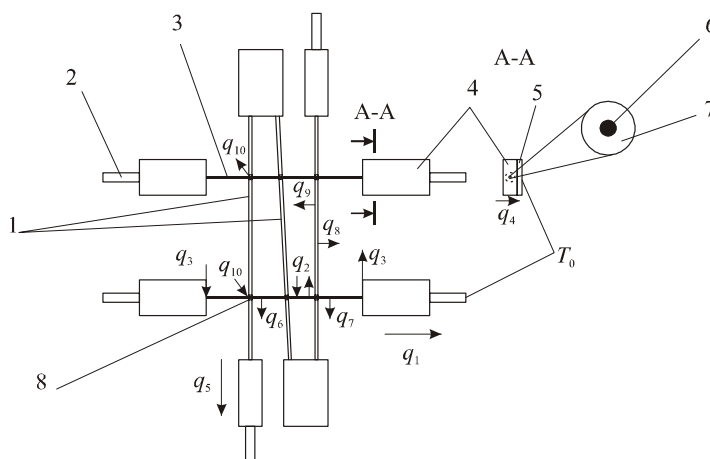


Рис. 1. Фізична модель диференційного термоелектричного вимірювального перетворювача.

1 – вітки диференційної термопарей, 2 – струмопідводи, 3 – нагрівник у скляній ізоляції, 4 – шар припою,

5 – мідна контактна пластина, 6 – манганіновий нагрівник, 7 – скляна ізоляція нагрівника,

8 – спай термопарей.

Термоелектричний диференційний вимірювальний перетворювач складається з

нагрівника з манганінового мікропроводу у скляній ізоляції 3, що кріпиться до струмопідводів 2 за допомогою припою 4, диференційної термопарі 1, яка кріпиться до струмопідводів 2 за допомогою припою 4 і має тепловий контакт з нагрівником у місцях спаїв 8.

Струм, протікаючи через нагрівник, викликає виділення тепла, яке через контакт у місцях спаїв передається термопарі, у якій виникає термоЕРС. Внаслідок втрат через теплопровідність з нагрівника  $q_1$  та термопарі  $q_2$ , випромінювання  $q_6$  і  $q_8$ , та конвекцію  $q_7$  і  $q_9$  не все тепло, що виділяється нагрівником, йде на розігрів спаїв термопарі. Також на спаях нагрівника зі струмопідводами діє ефект Пельтьє, що виявляється у виділенні або поглинанні тепла  $q_3$ , а в об'ємі нагрівника – ефект Томсона, внаслідок якого виділяється або поглинається тепло  $q_2$ . Ефекти Пельтьє і Томсона спричиняють виникнення похибки асиметрії при вимірюваннях – при однакових діючих значеннях змінного і постійного струму вихідна термоЕРС буде різною. Генерований термопарою струм спричиняє виникнення ефекту Пельтьє на спаях термопар, що призводить до виділення або поглинання деякої кількості тепла  $q_{10}$ .

### Математична модель диференційного термоелектричного вимірювального перетворювача

Фізична модель диференційного термоелектричного перетворювача описується системами рівнянь (1) та (2).

$$\begin{cases} \nabla(k\nabla T) + Q_j = 0 \\ \nabla j = Q_j \\ j = \sigma E + j_e \\ E = -\nabla V \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

де  $Q_j$  – тепловий потік внаслідок дії ефекту Джоуля,  $T$  – абсолютна температура,  $k$  – коефіцієнт теплопровідності,  $D$  – електрична індукція,  $B$  – магнітна індукція,  $E$  – напруженість електричного поля,  $H$  – напруженість магнітного поля,  $j$  – густина струму,  $\sigma$  – електропровідність,  $V$  – потенціал,  $T$  – абсолютна температура,  $k$  – коефіцієнт теплопровідності.

Системи рівнянь (1) та (2) розв'язуються з граничними умовами (3) і (4):

$$\begin{cases} T|_{z=0} = T_{amb} \\ q|_{z \neq 0} = \alpha(T_{amb} - T) + \varepsilon \sigma_B (T_{amb}^4 - T^4) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} V|_{x=a} = 0, \\ V|_{y=b} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де  $q$  – густина теплового потоку,  $T$  – абсолютна температура,  $T_{amb}$  – температура оточуючого середовища,  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  $\varepsilon$  – коефіцієнт випромінювання,  $\sigma_B$  – стала Больцмана,  $V$  – потенціал,  $I$  – номінальний струм через нагрівник.

## Комп'ютерна модель диференційного термоелектричного вимірювального перетворювача

З метою отримання розподілів температури та потенціалу було створено тривимірну комп'ютерну модель термоелектричного диференційного вимірювального перетворювача. Для побудови комп'ютерної моделі використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics, який робить можливим розв'язування рівняння методом скінченних елементів. На рис. 2 зображено сітку методу скінченних елементів.

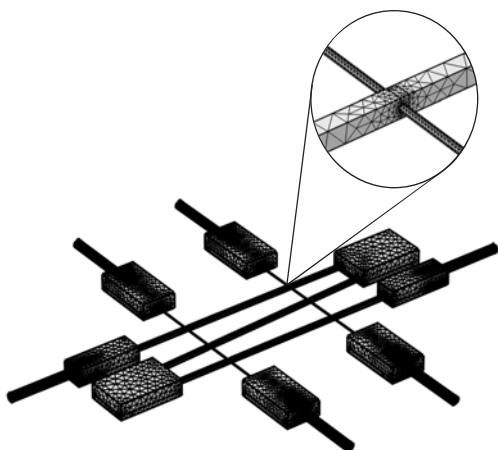


Рис.2. Сітка методу скінченних елементів.

У моделі вважалося, що вимірювальний ДТП знаходиться на повітрі.

Для постійного струму розрахунки показали, що за номінального струму  $I = 7$  мА вихідна термоЕРС становить  $E = 23.000004$  мВ, що відповідає експериментально встановленим даним. Також було отримано розподіли температури (рис. 3, 4) та потенціалу (рис. 5) у вимірювальному диференційному термоелектричному перетворювачі (ДТП).

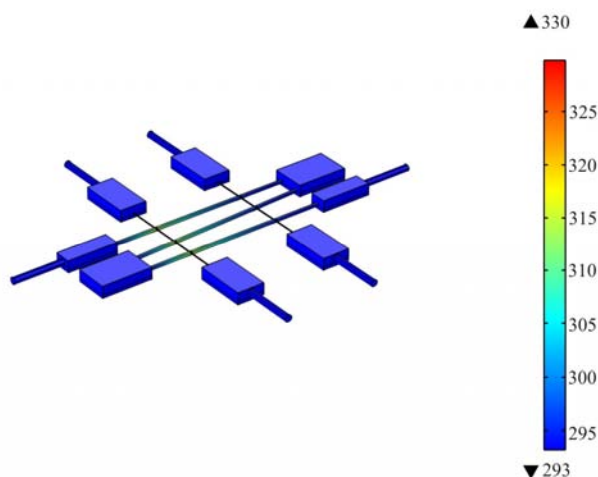


Рис. 3. Розподіл температури у досліджуваному ДТП.

Використання у моделі змінного струму призвело до необхідності застосування модуля розрахунків, який складається з двох кроків. Модуль heat transfer in solids не працює з модулем розрахунків frequency domain, тому розрахунки електричної частини здійснювались у frequency domain, а потім результати передавались у модуль heat transfer in solids, який розраховувався в модулі Stationary domain.

Максимальне значення температури, до якої розігрівається нагрівник в процесі вимірювань впливає на його здатність до перевантаження. За температури вище 373 К у манганіновому мікропроводі починаються необоротні зміни, що негативно впливають на характеристики термоперетворювача. На рис. 4 наведено розподіли температури у нагрівниках вимірювального ДТП.

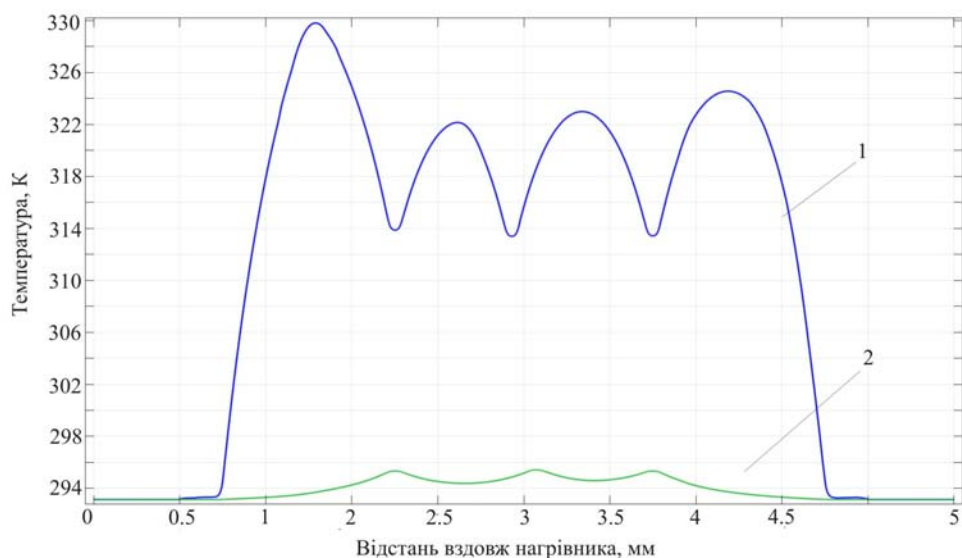


Рис. 4. Розподіли температури: 1 – у нагрівнику, по якому тече постійний струм, 2 – у нагрівнику, по якому не тече струм.

З рис. 4 видно, що температура в жодній точці нагрівника не перевищує 330 К, а отже, не відбуваються необоротні зміни у матеріалі нагрівника як на постійному, так і на змінному струмі, які можуть призвести до погіршення характеристик ДТП.

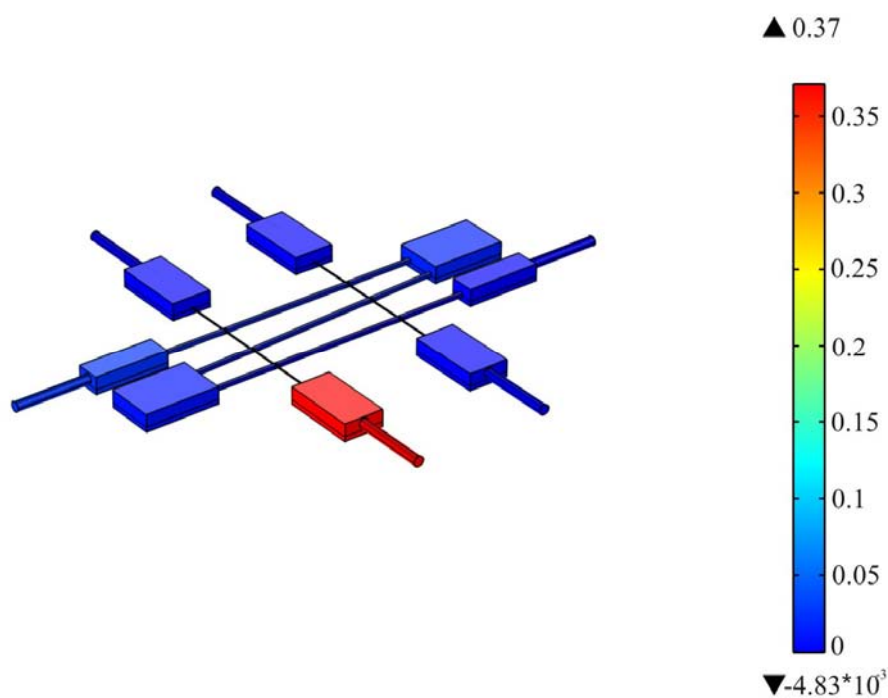


Рис. 5. Розподіл електричного потенціалу у досліджуваному ДТП.

На рис. 6 наведено порівняння розрахованої похибки перетворення змінного струму в діапазоні частот 1 кГц – 30 МГц з експериментальними даними.

Для змінного струму частотою 30 МГц розрахунки показали, що за ефективного значення струму  $I = 7$  мА вихідна термоЕРС становить  $E = 23.000184$  мВ.

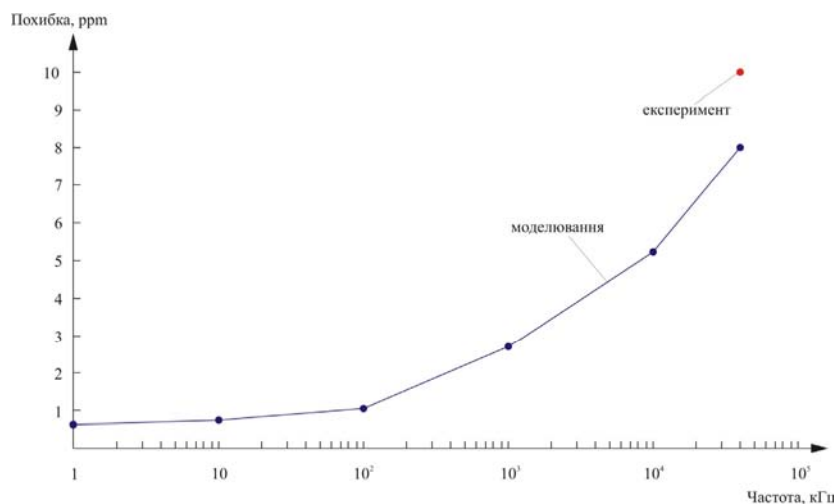


Рис. 6. Залежність розрахованої похибки перетворення від частоти вимірюваного сигналу

При цьому похибка перетворення становить 8 ррт, що задовільно корелює з експериментально встановленими даними.

## Висновки

1. Побудовано комп'ютерну модель та отримано розподіли потенціалу і температури у диференційному вимірювальному перетворювачі у режимі різночасового компарування.
2. Показано, що за номінального струму 7 мА температура нагрівника не перевищує 330 К, що не призводить до деградації характеристик матеріалу нагрівника.
3. Розрахована похибка перетворення змінного струму ДТПТ відрізняється від експериментальних даних не більше ніж на 20%.
4. Створена модель дає можливість використовувати її для проектування нових термоперетворювачів з іншою геометричною конфігурацією елементів.
5. Наведені результати було використано при розробці Військового вторинного еталону одиниці змінної напруги.

## Література

1. T.F. Wunsch., J.R. Kinard, R.P. Manginell, O.M. Jr. Solomon, T.E. Lipe and K.C. Jungling, *IEEE Transactions on. Instrumentation and. Measurement* (2001), p.330.
2. J.R. Kinard, T.E. Lipe and T.F. Wunsch, *Digest of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements(Canada, 2002)*, p.364.
3. T.E. Lipe, C.D. Reintsema and J.R. Kinard, *CPEM 2002 Conference Digest (Canada, 2003)*, p.108.
4. Л.И.Анатичук, *Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник*. К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
5. Klonz M. Laiz H. Kessler E. *Development of Thin-Film Multijunction Thermal Converters at PTB/IPHT // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 6, December 2001 p. 1490 – 1498
6. Lee Y.H. Kwon S.W. Kim K.J. Park S.I. Ihm Y.E. *Performance improving of KRISS Micromachined Multijunction Thermal Converter // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2004. – P. 591 – 592.
7. Эталон единицы напряжения переменного тока на основе термопреобразователей / Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова, Ю.В. Артюхова [ и др.] // *Термоэлектричество*. – №3. – 2012. – С. 79 – 90.

Надійшла до редакції 17.08.2015