

В. І. Боднарук

**СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ
ВИМІРЮВАЛЬНИХ
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗМІННОГО
СТРУМУ**



Д. Д. Тащук

В.І. Боднарук¹, Д. Д. Тащук²
(¹Чернівецький національний університет
ім. Ю.Федьковича;

²Інститут термоелектрики, Чернівці, Україна)

- На основі порівняльного аналізу вимірювальних термоперетворювачів, виготовлених за різними технологіями, подано коротку характеристику їх переваг і недоліків, обґрунтовано перспективні напрямки теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на створення нових сучасних приладів відповідно до вимог сьогодення.

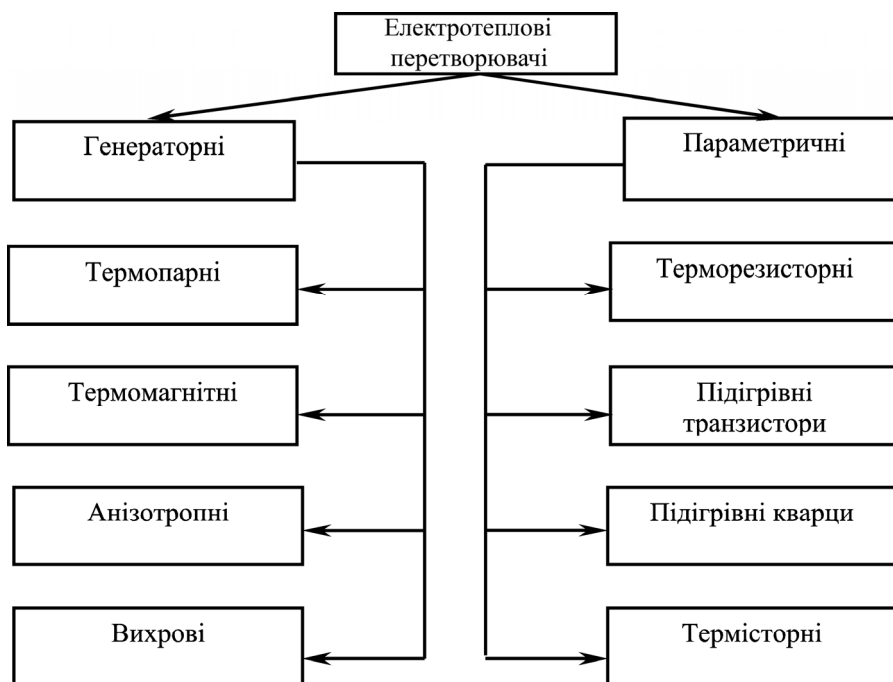
Вступ

Єдина істинна міра потужності електричного сигналу – його дієве (ефективне) значення. Тільки воно точно відображає потужність сигналу і, відповідно, відкриває можливість прямого і строгого порівняння (компарування) теплової дії сигналів постійного і змінного струмів, незалежно від їх форми, електротепловим методом [1].

Прообразом електротеплового приладу послужив термохрест для дослідження теплової дії струму, створений Пельтьє у 1834 році. 1884 року Н.А. Гезехус запропонував використати подібний термохрест як прилад для вимірювання сили струму в електричному колі. Пристрій Гезехуса складався з двох термобатарей, спаї яких було вмонтовано в резервуари повітряного диференційного термометра. У разі пропускання електричного струму через термобатарей, термометр реєстрував зміну температури, пропорційну силі струму [3].

Таблиця 1

Класифікація електротеплових перетворювачів змінного струму



Наведена в таблиці 1 класифікація охоплює відомі на сьогодні прилади, в яких для здійснення перетворень можуть використовуватися різні фізичні явища, наприклад, температурна залежність опору терморезистора, зміна частоти внаслідок підігріву кварцу тощо. Спільним для всіх видів перетворювачів є перетворення вимірюваного сигналу в теплову енергію, яка виділяється в нагрівнику. Найширше розповсюджені розігрівні безконтактні перетворювачі генераторного типу на основі термопар, які розглянемо детальніше.

Актуальність досліджень обумовлена тим, що на сьогодні різко зросли вимоги до точності вимірювання електричних величин змінного струму в розширеному діапазоні частот, і метрологічні центри багатьох країн проводять інтенсивні пошуки нових технічних рішень та розробляють високоточні вимірювальні прилади і засоби їх метрологічного забезпечення.

Мета огляду – на основі порівняльного аналізу вимірювальних термоперетворювачів, виготовлених за різними технологіями, подати коротку характеристику їх переваг і недоліків, обґрунтувати перспективні напрямки теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на створення нових сучасних приладів відповідно до вимог сьогодення.

Класифікація та порівняльний аналіз вимірювальних термоперетворювачів

Основним елементом термоелектричного методу компарування є вимірювальний термоперетворювач, в якому енергія вимірюваного струму перетворюється в теплову енергію, що виділяється в резистивному нагрівнику, і наступне перетворення теплової енергії в електричну за допомогою термоелемента (термопари). Нагрівник є вхідним колом термоперетворювача (ТП), термопара – вихідним. Зв'язок між струмом I_H , який підводиться до нагрівника, і ЕРС, що розвивається термоелементом E_T , наближено описується виразом

$$E_T = KI_H^2, \quad (1)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від матеріалу нагрівника і термоелемента, конструкції ТП і умов його роботи.

З виразу (1) випливає основна властивість вимірювальних термоперетворювачів (ВТП) – незалежність ЕРС на його виході від напрямку струму у вхідному колі, що дає можливість застосовувати ВТП для вимірювання дієвих значень змінного струму, потужності та інших величин [2].

Коли відомі співвідношення між змінними величинами струмів, які підводяться до термоперетворювача, і термоЕРС термопари, можна вимірювати змінні струми апаратурою постійного струму. Висока точність термоелектричного методу ґрунтується на результатах всебічного вивчення фізичних ефектів та теплових процесів, які відбуваються в термоперетворювачах, і їх впливу на точність перетворення. Таким чином, точність вимірювання величин змінного струму в основному залежить від якості термоелектричних перетворювачів.

Термопарні вимірювальні перетворювачі в процесі свого розвитку постійно вдосконалювались, змінювалися схеми їх побудови для підвищення точності і надійності вимірювань. У таблиці 2 наведено класифікацію термоперетворювачів, у яких різними способами здійснюється взаємозв'язок між вхідним і вихідним колами.

Узагальнену модель термопарного вимірювального перетворювача та його еквівалентну електричну схему наведено на рис. 1 а, б.

У такому перетворювачі здійснюється найпростіше перетворення потужності сигналу вимірюваної величини P в потужність вихідного сигналу перетворювача

$$P = K_0 P_{\text{вих}}, \quad (2)$$

де K_0 – коефіцієнт, який характеризує ефективність перетворення [5].

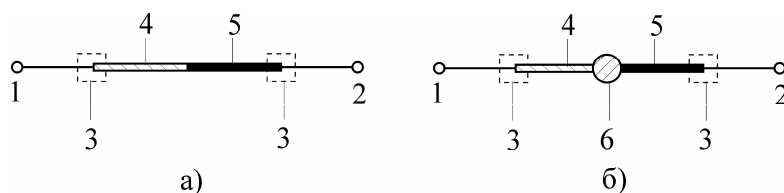


Рис. 2. Моделі термоперетворювачів безпосереднього нагріву (а) з додатковим нагрівачем (б).
1, 2 – електричні виводи, 3 – термостат, 4, 5 – вітки термопар, 6 – додатковий нагрівник.

Перетворювач безпосереднього нагріву, модель якого зображено на рис. 2а, не має розділених входного і вихідного кіл. Термопара, що складається з віток 4 і 5, служить одночасно входним і вихідним колом. Вимірюваний змінний струм в такому ТП протікає через термопару, розігрівуючи її вітки і спай. Постійна складова ЕРС, що генерується термопарою, відводиться з її холодних (T_0) кінців до вимірювального приладу постійного струму.

Перевагою таких ТП є гранична простота конструкції та мінімальне число робочих елементів. Є реальна можливість зведення до мінімуму величини теплових втрат і, отже, досягнення високої чутливості та максимальної швидкодії.

Недолік – відсутність можливості градування їх на постійному струмі внаслідок спотворюючої дії ефектів Пельть'є і Томсона, невисока точність перетворення, обмежений частотний діапазон.

Модель для пояснення принципу роботи ТП безпосереднього нагріву за мостовою схемою наведено на рис. 3.

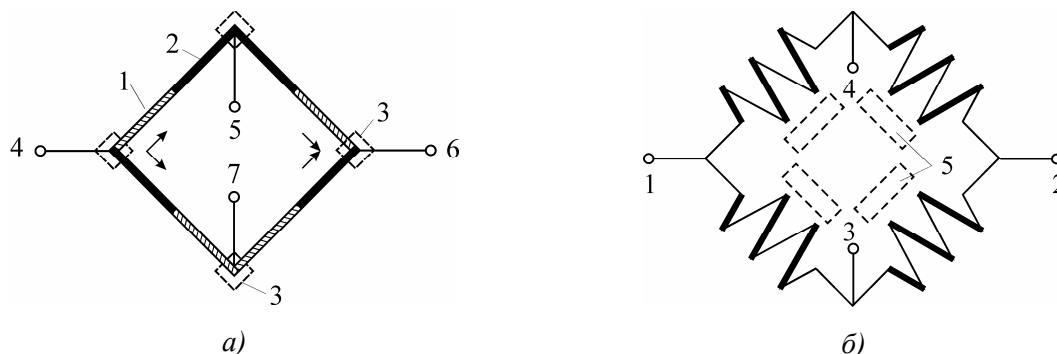


Рис. 3. Моделі термоперетворювачів за мостовою схемою (а) одноелементний.

1, 2 – вітки термопар, 3 – термостати (T_0), 4, 6 – контакти для підведення вимірюваного струму, 5, 7 – виводи термоЕРС; (б) багатоелементний, де позначено: 1, 2 – вхід; 3, 4 – вихід, 5 – термостати.

Як видно з рис. 3а, мостова схема ТП складається зі з'єднаних відповідним чином чотирьох термопар, через які протікає вимірюваний струм. Кожна з термопар становить собою, по суті раніше розглянутий термоперетворювач безпосереднього нагріву. Вихідна термоЕРС чотирьох послідовно-паралельно з'єднаних термопар виводиться до вимірювального приладу постійного струму.

На рис. 3б наведено модель багатоелементного перетворювача, виконаного за мостовою схемою.

Перетворювачі безпосереднього нагріву за мостовою схемою можуть бути виготовлені на будь-яке число термопар, кратне чотирьом, тоді в кожне плече моста включається n термопар, що дає можливість збільшити коефіцієнт добротності A [4].

Збільшення коефіцієнта добротності важливе для виготовлення точних і надійних переносних термоприладів.

Переваги ТП безпосереднього нагріву за мостовою схемою – це висока чутливість і швидкодія.

Вади – значна спільна ділянка кола змінного і постійного струму, що обмежує частотний діапазон застосування, та відсутність можливості градування на постійному струмі і складність виготовлення, як наслідок – невисока точність перетворення.

На рис. 4 зображена модель термоперетворювача з частково суміщеними елементами.

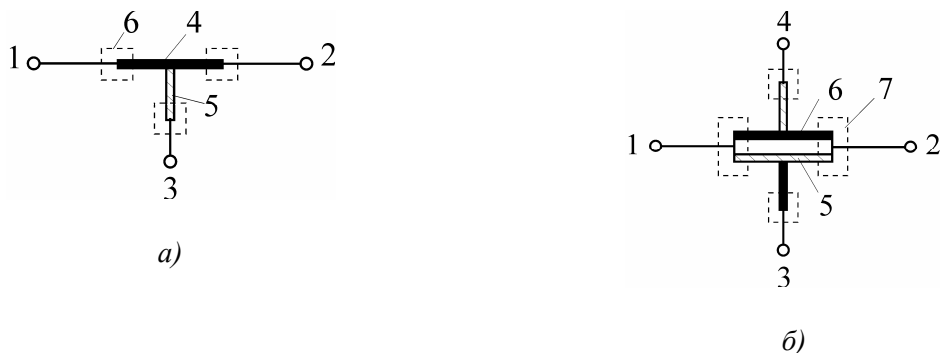


Рис. 4. Модель ТП безпосереднього нагріву з частково суміщеними елементами (а).

1, 2 – вхідне коло, 2,3 – вихідне коло, 4,5 – вітки термопар, 6 – термостат.

Термоперетворювач з частково суміщеними елементами за мостовою схемою Шерінга (б).

1, 2 – вхід; 3, 4 – вихід; 5,6 – вітки термопар - нагрівачі; 7 – термостати.

У ТП, модель якого наведена на рис. 4, вимірюваний змінний струм протікає по одній з віток термопар 1, однак він не переходить, як це має місце у розглянутих вище ТП, із одного матеріалу в інший. Це дає можливість частково вирішити проблему незалежної оптимізації параметрів вхідного і вихідного кіл ТП, що неможливо в перетворювачах безпосереднього нагріву, в яких нагрівник і термопарі суміщені повністю.

ТП за трививідною схемою використовуються в трансформаторних перетворювачах, де нагрівник живиться від окремої вторинної обмотки вимірювального трансформатора і градуються на змінному струмі пониженої частоти [9, 16].

Якщо зробити дзеркальне відображення елементів ТП (рис. 4а) і поміняти місцями матеріал віток термопар, то отримаємо ТП за мостовою схемою Шерінга (рис. 4б).

Такий ТП складається з двох послідовно з'єднаних термопар з безпосереднім нагрівом. Одна із віток кожної термопарі має дві паралельно з'єднані вітки (розгалужується). Якщо чотирикутник, утворений розгалуженням обох термопар, буде симетричним за повним опором, то термострум не потрапляє у вимірювальне коло, а вимірюваний струм – у вимірювач термоЕРС.

Вада таких ТП – відносно велика спільна ділянка кола змінного і постійного струму, обмежений частотний діапазон та складність виготовлення добре зрівноважених мостових схем, обмежений вибір матеріалів. Матеріали віток термопар, які розігріваються струмом, необхідно вибирати з близькими теплотехнічними і температурними коефіцієнтами.

Подальше розширення робочого частотного діапазону і підвищення точності перетворення сигналів змінного струму досягнуто в ТП, у яких спільну ділянку суміщених елементів зведено до точкового контакту. Найпростішим ТП цього типу є “термохрест” (рис. 5), утворений з'єднанням двох термоелектродів по геометричній середині. Коло, утворене відрізками провідників від місця з'єднання до контактів 1, 2, є вхідним, а відрізками від місця з'єднання до контактів 3, 4 – вихідним. Як і в ТП безпосереднього нагріву, нагрівник складається з відрізків двох матеріалів, і робочий струм переходить із одного матеріалу в інший, що не дає можливість такий ТП застосовувати на постійному струмі. Ще однією вадою ТП типу “термохрест” є неможливість роздільної оптимізації параметрів вхідного і вихідного кіл. Наприклад, зі створенням ТП на великі струми, формуючи нагрівник, необхідно використовувати половини

дротин, які утворюють термопару, великого перерізу, що призводить до зростання теплової інерції і збільшує відведення тепла від гарячого спаю – знижує чутливість [12]. В силу вказаних причин ТП “термохрест” мають обмежене застосування.



Рис. 5. Модель ТП типу “термохрест” (а) і контактної ТП з окремим нагрівником (б).
1, 2 – коло нагрівника; 3, 4 – коло термопар; 5 – термостат; 6, 7 – вітки термопар.
На рис. 5 б: 1 – нагрівник; 2, 3 – вітки термопар; 4 – термостат.

Порівняно високі параметри і характеристики мають контактні ТП з нагрівником у вигляді лінійного відрізка провідника із резистивного матеріалу. По геометричній середині нагрівник з’єднаний (наприклад, зварюванням) зі спаєм термопар (рис. 5).

У цьому перетворювачі властивості нагрівника можуть бути оптимізовані відповідно до температурних і частотних вимог незалежно від властивостей матеріалів віток термопар. У конструкціях контактних ТП досягнуто значне покращення точності перетворення і розширення частотного діапазону.

Вада таких термоперетворювачів – наявність гальванічного контакту між вхідними та вихідними колами, що призводить до збільшення похибок на високих частотах.

ТП, у яких електричного контакту між нагрівником і термопарою немає, а тепловий контакт здійснюється через електроізолятор із матеріалу з доброю теплопровідністю, називають безконтактними [14].

У безконтактному термоперетворювачі з теплопереходом у вигляді ізоляційної «краплі» досягнуто суттєвого покращення метрологічних і експлуатаційних характеристик. Це зумовлено в першу чергу тим, що вхідне і вихідне кола термоперетворювача гальванічно розв’язані. Величина опору ізоляційного теплопереходу понад 100 МОм, що суттєво зменшує можливість проникнення змінного струму в коло термопар і відповідно вимірювального приладу.

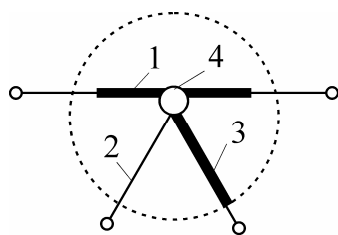


Рис. 6. Модель безконтактного ТП з однією термопарою.
1 – нагрівник, 2, 3 – вітки термопар,
4 – ізоляційна “крапля”.

Крім того, матеріали нагрівника і термопар можуть бути незалежно оптимізовані відповідно до теплових й електричних вимог для забезпечення оптимальних умов перетворення. Унаслідок цього в безконтактних перетворювачах досягнуто значно менших похибок перетворення в діапазоні частот змінного струму.

Зниження похибки асиметрії без значного погіршення частотної характеристики ТП досягається в приладах (рис. 7) зі збільшеною

областю теплового контакту нагрівника із термопарою, утвореною теплопереходом у вигляді капсули, заповненої газом із високою теплопровідністю, наприклад, воднем.

Подальше поліпшення частотних характеристик, а також підвищення пробійної напруги досягається в ТП із теплопередачею випромінюванням. Будову такого ТП зображено на рис. 8, перетворювач вмонтований в корпус, що має форму еліпсоїда обертання, внутрішня поверхня якого покрита відбиваючою плівкою.

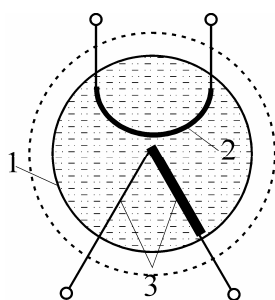


Рис. 7. Модель перетворювача з теплопереходом у вигляді капсули, заповненої газом.
1 – капсула, 2 – нагрівник, 3 – термопара.

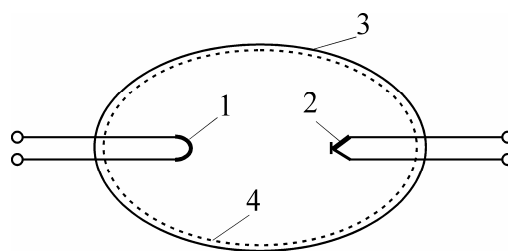
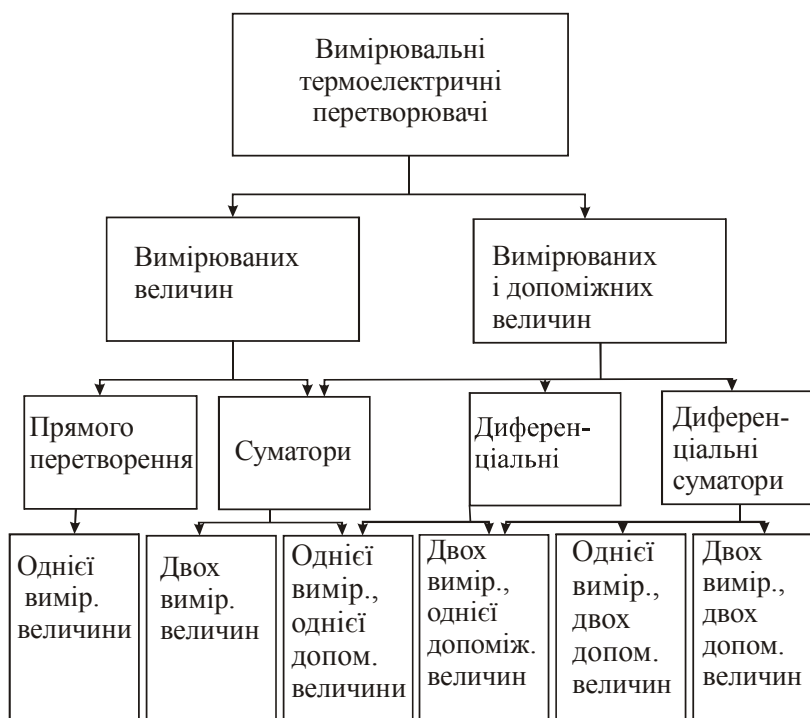


Рис. 8. Модель перетворювача з корпусом еліпсоїдальної форми.
1 – нагрівник, 2 – термопара, 3 – корпус, 4 – відбиваюче покриття.

Таблиця 3

Класифікація термоперетворювачів за кількістю перетворюваних вхідних величин



Поблизу одного із фокусів еліпсоїда розташований нагрівник, а біля іншого – термопара із приймальною площадкою. Для зниження конвективних втрат корпус вакуумується. У таких приладах нагрівник і термопара можуть бути розташовані на відносно великих віддальх, що дає можливість суттєво знизити величину перехідної ємності і вплив струмів високої частоти на вихідне коло термопари.

Досвід розробки і експлуатації безконтактних перетворювачів сприяв створенню приладів з розширеними функціональними можливостями і підвищеною точністю перетворення змінного струму. Такі вимірювальні перетворювачі, подібно до відомої класифікації засобів вимірювань [4], можна умовно поділити на перетворювачі вимірюваних величин і перетворювачі вимірюваних і допоміжних величин.

Класифікацію термоперетворювачів за кількістю перетворюваних величин наведено в табл. 3.

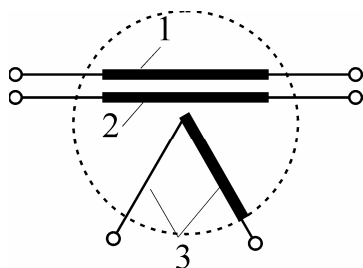


Рис. 9. Модель перетворювача-суматора.
1,2 – нагрівники, 3 – термопара.

На рис. 9 наведено модель перетворювача-суматора. Перетворювач-суматор складається з двох електрично ізольованих нагрівників, які мають тепловий контакт з термопарою або батареєю термопар.

У такому перетворювачі відбувається перетворення виду

$$E_T = k(I_{H1}^2 + I_{H2}^2), \quad (3)$$

де I_{H1} і I_{H2} струми в нагрівниках 1 і 2 відповідно.

Струми I_{H1} і I_{H2} можуть бути спричинені поданням на входи перетворювача двох незалежних вимірюваних сигналів або одного вимірюваного і одного допоміжного сигналів. У першому випадку вихідна термоЕРС E_T є функцією суми двох вимірюваних величин, у другому – можна реалізувати оригінальний метод перетворення, який отримав назву методу рівних температур [6]. У цьому випадку зі зміною вимірюваної величини допоміжну змінюють таким чином, щоб сумарна потужність обох перетворюваних величин залишалась постійною і робоча температура спаю термопари не змінювалася. Температуру, яку підтримують постійною, вибирають оптимальною для даного термоперетворювача, тобто, коли забезпечуються одночасно максимальне значення E_T і задовільна точність перетворення та стабільність. У разі використання методу рівних температур зменшується вплив на точність перетворення температурних залежностей параметрів матеріалів нагрівника і термопари та нелінійність теплових втрат [7].

Низькі експлуатаційні та метрологічні параметри перетворювачів з металевими термопарами (наприклад, типу ТВБ 1–9) ускладнюють їх використання під час розробки сучасних електровимірювальних приладів, що вимагає застосування різноманітних структурних методів підвищення точності [8, 9].

У диференціальному перетворювачі два ідентичні нагрівники знаходяться в тепловому контакті зі спаями диференціальної термопари.

У такому перетворювачі здійснюється перетворення виду

$$E_T = k(I_{H1}^2 - I_{H2}^2). \quad (4)$$

Струми нагрівників I_{H1} і I_{H2} можуть бути спричинені як сигналами двох вимірюваних величин змінного струму, так і однієї змінного струму та однієї допоміжної постійного струму.

На рис. 10 наведено моделі диференціальних перетворювачів.

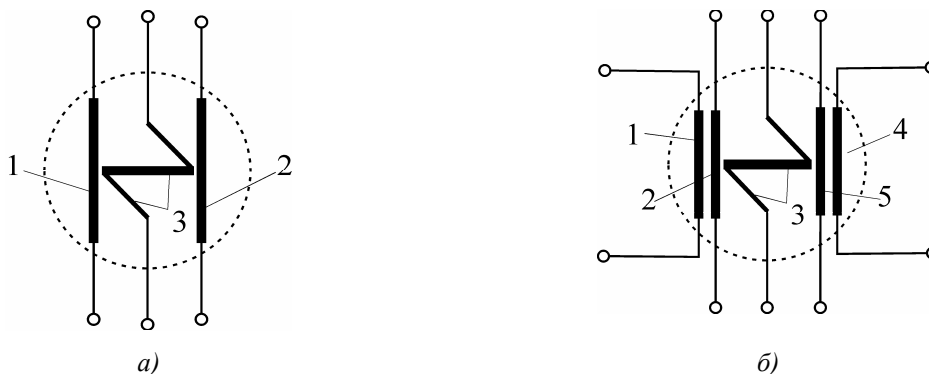


Рис. 10. Модель диференціального перетворювача (а) і диференціального суматора (б).
1, 2, 4, 5 – нагрівники, 3 – диференціальна термопара.

У короткій класифікації, наведеній вище, подано основні типи моделей термоелектричних перетворювачів, на яких створюються і вдосконалюються сучасні перетворювачі змінного струму за новими технологічними принципами. На сьогодні в їх розвитку виділилося три основні напрямки:

- криогенні перетворювачі на основі ефекту Джозефсона [10, 11];
- перетворювачі на основі напівпровідникових оптимізованих матеріалів [12–15];
- тонкоплівкові перетворювачі [16, 17].

Криогенні перетворювачі на основі ефекту Джозефсона мають високу чутливість і їх використовують у першу чергу для дослідження гранично малих значень змінного струму. Однак висока вартість і складність таких систем обмежують їх широке застосування.

Плівкові перетворювачі на основі мікроелектронної технології відзначаються порівняно високою відтворюваністю параметрів, ідентичністю та точністю перетворення постійного струму. До їх недоліків слід віднести обмежений частотний діапазон перетворення і великий опір плівкової термобатарей, що спричиняє високий рівень шумів [18].

Розробка напівпровідникових термоелектричних матеріалів, оптимізованих згідно з вимогами вимірювальної техніки і метрології, створила умови для принципово нових рішень у проектуванні та виготовленні термоелектричних перетворювачів:

- досягнення чутливості 100 В/Вт створило умови розширення діапазону вимірюваних змінних струмів у бік малих номінальних значень до 0.1 мА;
- зменшення робочої температури нагрівника в 10–15 разів (порівняно з перетворювачами на основі металевих термопар) підвищило здатність до перевантаження і зумовило зменшення впливу ефекту Томсона на точність перетворення постійного струму;
- висока чутливість напівпровідникових термопар дала можливість відмовитися від вакуумування робочого об'єму перетворювачів з чутливістю до 10 В/Вт і значно урізноманітнити вибір конструкційних матеріалів, наприклад, для розширення робочого діапазону частот до 500 МГц;
- відмова від вакуумування і заповнення робочого об'єму перетворювачів з однією термопарою сумішшю газів дали можливість реалізувати відхилення від квадратичності перетворення 0.01–0.005%;
- використання напівпровідникових термопар дає можливість підвищити швидкодію перетворювачів у 10 і більше разів.

Висновки

Поряд із пошуком і використанням нових фізичних явищ для створення високочутливих первинних вимірювальних перетворювачів (наприклад, на ефекті Джозефсона) та сучасних технологій їх виготовлення, актуальним і перспективним залишається детальне вивчення:

- теплових умов і температурних режимів роботи напівпровідникових термоперетворювачів;
- впливу конфігурації і властивостей матеріалів тепловіділяючих елементів та форми термоелементів на теплові процеси;
- особливостей теплообміну в газонаповнених конструкціях приладів.

Це відкриває додаткові можливості для розробки нових конструкцій напівпровідникових термоперетворювачів:

- диференційних з високою ідентичністю характеристик, підвищеним вихідним сигналом, зменшеною частотною похибкою і підвищеною надійністю;
- малогабаритних – підвищеної швидкодії з розширеним частотним діапазоном;
- екранованих, з більшими функціональними можливостями – для роботи в електромагнітних полях;
- високочутливих перетворювачів на малі значення номінальних струмів.

Література

1. Van Erk T.H., Rauch S. How to measure ac signals accurately// Test and Measuring Instruments. – 1976. – P.94-96.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.
3. Буряк А.А., Карпова Н.Б. Очерки развития термоэлектричества / Отв.ред. Анатычук Л.И. – К.: Наук. думка, 1988. – 280 с.
4. Туричин А.М., Новицкий П.В. и др. Электрические измерения неэлектрических величин / – К.: Энергия, 1975. – 576 с.
5. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
6. Попов В.С. Измерение среднеквадратического значения переменного тока способом равных температур // Измерительная техника. – №7. – 1999. – С.53-59.
7. Попов В.С. Компараторы тока, напряжения и активной мощности на электротепловых преобразователях // Измерительная техника. – №9. – 1999. – С.56-60.
8. Туз Ю.М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств. – К.: Выща школа, 1986. – 160с.
9. Туз Ю.М. Исследование динамических свойств линейного преобразователя эффективных значений переменного тока // Вестник КПИ. Сер. автоматика и электроприборостроение. – К. – 1972. – №9. – С.168-170.
10. Burrougs C.J., Bens S.P., Hamilton C.A., Harvey T.E., Kinard J.R., Lipe T.E., Sasaki H. Thermoelectric Transfer Difference of Thermal Converters Measured with a Josephson Source //IEEE Transactions on instrumentation and measurement.–V.48.– No.2, april 1999.
11. Lipe T.E., Reintsema C.D. and Kinard J.R..An improved Sensor for the NIST Criogenic Thermal Transfer Standart // CPEM 2002 Conferense DiGest. –Ottava, Ontario,Canada, June 16-21, 2003. – P.108-109.
12. Анатычук Л.И., Андрусак С.А., Боднарук В.И., Гореликов Н.И., Лусте О.Я., Цыганюк Ю.С. Применение полупроводниковых анизотропных кристаллов для электрических измерений // Измерительная техника. – №2. – 1972. – С.52-56.
13. Анатычук Л.И., Боднарук В.И., Димитрашук В.Т., Лусте О.Я. О возможности управления температурной зависимостью параметров термоэлектрических преобразователей // ИФЖ. – 1976. – №2, 31.– С. 301-305.
14. Боднарук В.І. Малогабаритні напівпровідникові перетворювачі // Термоелектрика. –2002. – № 3. – С.46-49.
15. Боднарук В.І. Напівпровідникові термоелектричні перетворювачі змінного струму та прилади на їх основі // Термоелектрика. – 2005. – №1. – С.78-83.
16. Kinard J.R., Lipe T.E. and Wunsch T.F. Improved High-Current Thin-Film Multijunction Thermal Converters // CPEM 2002 Conferense DiGest. – Ottava, Ontario,Canada, June 16-21, 2003. – P.364-365.
17. Kinard J.R., Huang D.X., Novotny D.B. Performance of Multilayer Thin-Film Multijunction Thermal Converters // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – V.44. – NO.2, April 1995.
18. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.

Надійшла до редакції 10.02.09.