

УДК 537.32

Громов Г.Г., Глязер С.А., Захарцев Ю.В.

ТОВ «РМТ», Варшавське шосе будинок 46, Москва, 115230, Російська Федерація

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ДАТЧИКИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ

---

*Показано результати теоретичних і експериментальних досліджень датчиків теплового потоку, виготовлених за технологією термоелектричних мікромодулів. Досліджено залежності основних параметрів таких датчиків від властивостей термоелектричного матеріалу й параметрів конструкції модулів. На основі теоретичних досліджень розроблено новий метод самокалібрування термоелектричних датчиків теплового потоку, використовуючи вимірювані значення добротності  $Z$  і опору  $ACR$  модуля. Технологія мікромодулів «РМТ» дає можливість виготовляти мініатюрні датчики теплового потоку з параметрами в широкому діапазоні для задоволення потреб різноманітних застосувань. Підтверджено переваги термоелектричних датчиків теплового потоку – висока чутливість, швидкодія, мініатюрність і масштабованість, зміна параметрів за необхідності та інші.*

**Ключові слова:** термоелектричний модуль, теплота, потік, датчик.

*Results of theoretical and experimental investigations of heat flux sensors based on the technology of thermoelectric micromodules are reported. There were investigated dependences of the main parameters of such sensors on properties of thermoelectric materials and parameters of module design. On the base of theoretical investigations a new method of self-calibrations of thermoelectric heat flux sensors using measurement of the module Figure-of-Merit  $Z$  and resistance  $ACR$  was developed. The technology of thermoelectric micromodules of the company RMT Ltd. allows designing miniature heat flux sensors with a wide range of performance parameters on demands of variety of applications. Advantages of thermoelectric heat flux sensors – high sensitivity, fast response, miniature design, variable performance parameters, scalability, and some others were confirmed.*

**Key words:** thermoelectric, module, heat, flux, sensor.

### Вступ

Виділення й поглинання тепла, потоки теплової енергії супроводжують безліч фізико-хімічних перетворень, мають місце при природних і техногенних процесах і є результатом життєдіяльності людини. Вимірювання теплових потоків, як і температури, робить можливим контролювати ці процеси, одержувати потрібну інформацію, управляти цими процесами. Тепловий потік зазвичай вимірюють датчиками теплового потоку [1].

Вимірювання теплового потоку необхідне в різних областях: наукові дослідження; сільське господарство; кліматологія; промислове й житлове будівництво; сонячна енергетика; промислові застосування; житлово-комунальне господарство; охорона й безпека та ін. Датчики теплових потоків, як і температури, займають значну нішу на ринку сучасних сенсорів.

### Одиниці теплового потоку й характеристики датчиків

Тепловий потік  $P_s$  вимірюється в одиницях потужності ват на одиницю площі перпендикулярно до його напрямку – Вт/м<sup>2</sup>. Або вимірюється в одиницях сумарного теплового

поток  $P$  – Вт. Датчики теплового потоку мають чутливість до теплового потоку, яка також вимірюється у двох типах одиниць.

Чутливість до щільності теплового потоку  $S_e$  – відношення електричного сигналу датчика до щільності теплового потоку  $P_e$ . Одиниці – мкВ/(Вт/м<sup>2</sup>).

$$S_e = \frac{E}{P_e} \quad (1)$$

Інтегральна чутливість – це відношення електричного сигналу датчика до сумарної потужності теплового потоку, падаючого на даний датчик  $P$ . Одиниці – В/Вт.

$$S_a = \frac{E}{S \times P_e} = \frac{S_e}{S} \quad (2)$$

Поняття інтегральної чутливості поріднює датчики теплового потоку з фотоприймачами. З іншого боку це вірно тому, що випромінювання, це той же потік енергії/тепла. Датчики теплового потоку застосовують для вимірювання теплового випромінювання.

### Сучасні датчики теплового потоку

Принцип дії більшості датчиків теплових потоків заснований на методі «додаткової стінки» [1]. Суть – додаткова стінка з відомою теплопровідністю  $K$  розташовується на шляху теплового потоку  $P$ , який потрібно виміряти. При проходженні теплового потоку температурний градієнт  $\Delta t$  між сторонами стінки пропорційний величині теплового потоку. Коефіцієнт пропорційності – тепловий опір стінки  $R_T$ , величина зворотня теплопровідності:

$$\Delta T = R_T \times P \quad (3)$$

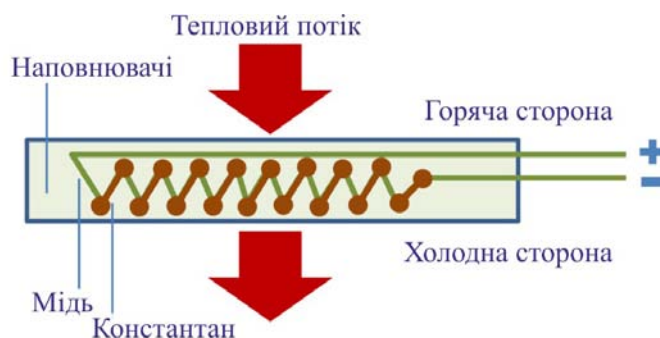


Рис. 1. Схематичне зображення датчика теплового потоку з диференціальних термопар.

У більшості сучасних датчиків теплових потоків для вимірювання різниці температур, створюваної тепловим потоком, використовують диференціальні термопари (рис. 1) [2]. Це ефект Зеебека в металах. Абсолютні значення термоЕРС металів невеликі – одиниці й десятки мкВ/град. Тому конструкція більшості сучасних датчиків на основі диференціальних термопар для збільшення чутливості – це безліч диференціальних термопар, з'єднаних послідовно (рис. 1) [3, 4]. Щільність такої конструкції може досягати 1000 – 2000 спаїв термопар на 1 см<sup>2</sup>. Цим забезпечується кратне (кількості спаїв  $N$ ) збільшення термоЕРС.

$$\Delta T = R_T \times P, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС (коефіцієнт Зеебека) на спай.

### Термоелектричні датчики теплового потоку

В останні роки зріс інтерес до застосування термоелектричних модулів як датчиків теплового потоку [5, 6]. Термоелектричні модулі широко застосовуються для охолодження (ефект Пельтьє) або

генерації енергії (ефекти Зеебека й Пельтьє). Тут теж використовується ефект Зеебека, що є фізичною основою датчиків на диференціальних термопарах. Конструкція термоелектричних модулів аналогічна матриці термопар – чергування термоелементів з різних напівпровідників *n*- і *p*-типу. Тільки тут «спай» – це пара термоелементів з різною провідністю напівпровідникових матеріалів (*n*- і *p*-типу), а в термопарі – це спай різнорідних металів.

У напівпровідниках ефект Зеебека багаторазово вищий, ніж у металах. Наприклад, у мідь-константановій термопарі термоЕРС на спай – 38 мкВ/°С. У термоелектричному охолоджувачі на одну пару термоелементів – більше 400 мкВ/°С.

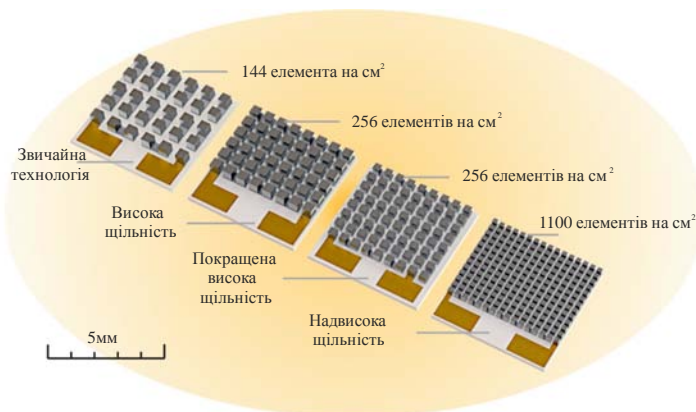


Рис. 2. Прогрес у мініатюризації й ущільненні термоелектричних модулів на прикладі розвитку технології мікромодулів «PMT».

Хоча термоелектричні модулі давно застосовуються як генератори і охолоджувачів, однак тривалий час ця перевага для датчикового напрямку не реалізовувалася. Ключовою причиною був невисокий ступінь інтеграції термоелементів. Довгий час це було на рівні 100 – 150 елементів на 1 см<sup>2</sup>. За невисокого ступеня інтеграції термоелектричних модулів такі датчики програють за сумарною термоЕРС матрицям з диференціальних термопар (4). Однак сучасний тренд у мініатюризації термоелектричних модулів (рис. 2) головним чином через потреби мініатюризації оптоелектроніки, де широко застосовується термоелектричне охолодження, призвело до значного прогресу в конструкції термоелектричних мікромодулів. Сучасні термоелектричні мікромодулі володіють такою ступінню інтеграції, яка порівнювана з датчиками на диференціальних термопарах, що робить можливим застосовувати їх як датчики теплового потоку.

Мініатюрні й високощільні в упакованні модулі виготовляються нині за двома технологіями – тонкоплівковою (нова) і об'ємною (традиційною).

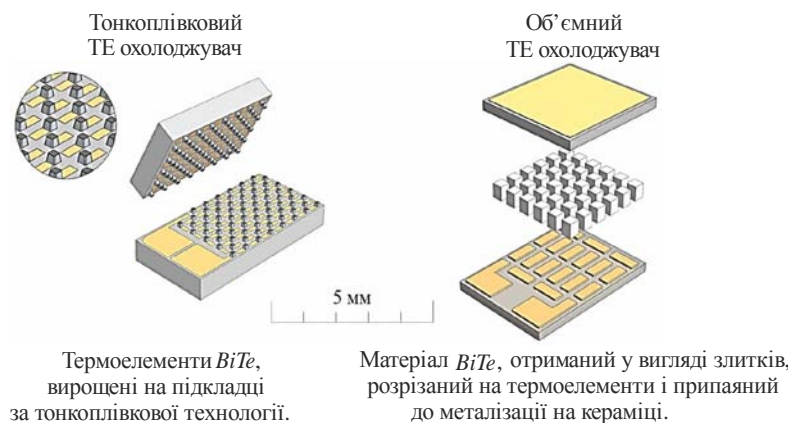


Рис. 3. Порівняння конструкцій термоелектричних модулів.

Кожна має свої переваги і межі застосування, але обидві забезпечують можливість робити мікромодулі, ще зовсім недавно неймовірних мініатюрних розмірів, як усієї конструкції (на рівні 1 мм<sup>2</sup> і менше) так і високої щільності їх упакування.

## Параметри термоелектричних датчиків теплового потоку

### Абсолютна чутливість

Величина електричного сигналу  $E$  термоелектричного датчика.

$$E = 2N \times a \times \Delta T, \quad (5)$$

де  $a$  – середній коефіцієнт Зеєбека на один термоелемент;  $2N$  – кількість термоелементів, звідки з урахуванням (3) абсолютна чутливість датчика  $S_a$ .

$$S_a = \frac{E}{P} = 2N \times a \times R_T. \quad (6)$$

В ідеальному випадку (тепло протікає тільки через термоелементи):

$$R_T = \frac{1}{K_T} = \frac{1}{2N \times k \times \frac{s}{h}}. \quad (7)$$

Тут  $K_T$  – теплопровідність датчика;  $k$  – питома теплопровідність на один термоелемент;  $s/h$  – відношення площі перетину ( $s$ ) термоелемента до висоти ( $h$ ) – форм-фактор термоелемента  $f$ .

Звідки чутливість датчика

$$S_a = \frac{1}{f} \times \frac{\alpha}{k}. \quad (8)$$

Чутливість термоелектричного датчика визначається відношенням коефіцієнта Зеєбека до питомої теплопровідності й обернено пропорційна форм-факторові термоелемента.

Важливий наслідок (8) – чутливість не залежить від кількості термоелементів. Місце цієї залежності займає обернена пропорційність від форми-фактора. Тобто, чим менша площа перетину відносно висоти термоелемента, тим чутливіший датчик. Чутливість можна збільшувати шляхом мініатюризації (малі перетини термоелементів) за порівняно великої висоти термоелементів.

### Питома чутливість

Питома чутливість  $S_e$  до щільності теплового потоку отримується із абсолютної чутливості, якщо домножити її на площу чутливої поверхні датчика  $S$  (2).

### Тепловий опір

Величина теплового опору датчика теплового потоку має визначальне значення. З одного боку саме завдяки тепловому опору створюється перепад температур (3), який викликає сигнал датчика. (великий тепловий опір – висока чутливість датчика). З іншого боку ефект присутності вимірювального датчика бажано звести до мінімуму, тому «допоміжна стінка», по можливості, не повинна бути додатковою, як її іноді називають.

### Постійна часу

Для термоелектричних датчиків застосовуємо вираз, використовуваний для розрахунків постійної часу термоелектричних мікроохолоджувачів

$$\tau = \frac{C_c}{f \times k \times 2N}, \quad (9)$$

де  $C_c$  – повна теплоємність кераміки термоелектричного модуля або обкладки датчика.

### Спосіб калібрування термоелектричного датчика

Для забезпечення високої точності вимірювань необхідне калібрування. Калібрування дає можливість одержати величину пропорційності вихідного сигналу таких датчиків від теплового потоку. Для калібрування датчиків теплового потоку застосовуються два способи.

Один спосіб – використання зовнішнього еталонного джерела теплового потоку [7, 8]. Таке калібрування здійснюється із застосуванням спеціального устаткування й у лабораторних умовах. Може проводитися тільки за періодичного обслуговування з витягуванням датчика з вимірюваного об'єкта. Тому спосіб трудомісткий, дорогий і обмежений у застосуванні.

Інший спосіб – у датчик вбудовується еталонне теплове джерело [9, 10], наприклад, напилений на одну з його чутливих сторін тонкоплівковий резистивний нагрівач [10]. За відомої електричної потужності, що виділяється еталонним джерелом датчика, чутливість визначається за його сигналом відгуку. Датчик з таким способом калібрування названий самокалібрувальним. Його перевага у можливості проводити калібрування в будь-який час без зовнішнього устаткування. Недоліком є те, що еталонне теплове джерело необхідно розмістити в самому датчику. Це ускладнює його конструкцію й здорожчує виробництво.

Термоелектричні модулі вже давно й широко використовуються в задачах для охолодження й генерації енергії. У цих застосуваннях використовується вимірювання ряду параметрів модулів для визначення їх споживчих властивостей і якості. Такими параметрами є термоелектрична добротність  $Z$ , власний опір  $ACR$  і, рідше – постійна часу  $\tau$ . Використання даних параметрів для визначення основних властивостей термоелектричних датчиків теплових потоків також є привабливим.

З формули для чутливості (6) випливає її залежність від добутку  $\alpha \times R_T$ . Можна виразити цей добуток через параметри  $Z$  і  $ACR$  термоелектричного модуля

$$Z = \frac{(2N \times a)^2 \times R_T}{ACR}. \quad (10)$$

Звідки

$$\alpha \times R_T = \frac{1}{(2N)^2 \times a} Z \times ACR. \quad (11)$$

Тоді формула (6) перетвориться в

$$S_a = \frac{1}{a \times 2N} Z \times ACR. \quad (12)$$

Формула (12) є ключовою нового способу калібрування термоелектричних датчиків теплових потоків. Конструкція термоелектричного модуля ( $2N$ ) заздалегідь задана. ТермоЕРС  $\alpha$  термоелектричного матеріалу, використовуваного для виготовлення датчиків, може контролюватися. За відомих площі чутливої поверхні  $S$ , кількості термоелементів  $2N$  і величині термоЕРС  $\alpha$  легко визначаються чутливості  $S_a$  і  $S_e$  за формулами (12) і (2) відповідно шляхом вимірювання термоелектричної добротності  $Z$  і власного опору  $ACR$ .

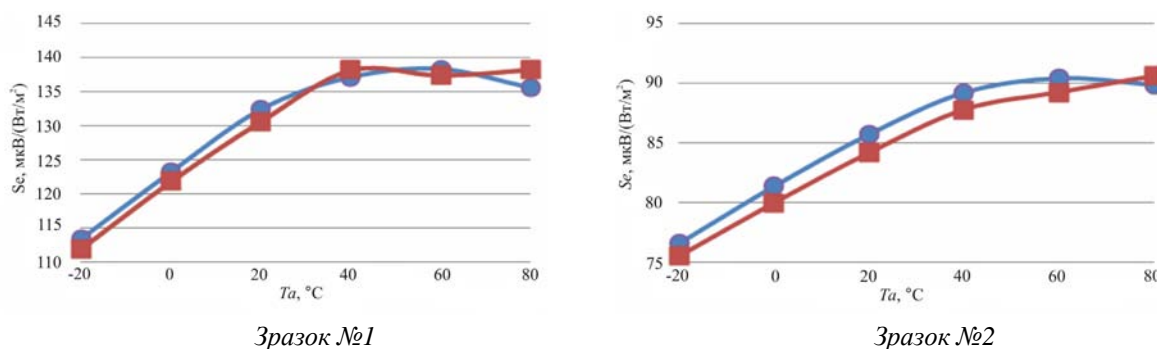


Рис. 4. Порівняння результатів калібрування способом з еталонним зовнішнім джерелом (червоне) з калібруванням за запропонованим способом (синє).

Встановлена чутливість датчиків за цим способом не більша 2% відрізняється від результатів еталонних змін (рис. 4). Це є гарним результатом для практичного використання такого способу. Він не вимагає застосування еталонних теплових джерел, не вимагає виводу датчиків з експлуатації для процедури калібрування, може проводитися з будь-якою періодичністю.

### Оптимізація конструкції датчиків «РМТ»

Як випливає из виразів (8), (2), ключові параметри термоелектричних датчиків теплового потоку залежать від їх конструктивних особливостей:

- 1) властивості термоелектричного матеріалу –  $a$ ,  $k$ ;
- 2) параметри термоелементів модуля, його термоелементів –  $f$ ;
- 3) площа поверхні  $S$ .

Технологія «РМТ» дає можливість виготовляти мікромодулі в широких діапазонах габаритних розмірів, ступенів мініатюризації, коефіцієнтів упакування, розмірів термоелементів і т.п. (рис. 2). Це уможливило розробку як окремих, так і серій, оптимізованих під різні застосування датчиків теплового потоку. Така практика застосовується компанією при розробці й виробництві мікромодулів для охолодження й генерації. Підхід застосовуємо і для датчикового напрямку.

### Властивості термоелектричного матеріалу

Властивості термоелектричного матеріалу задаються технологією його виготовлення. В оптимізації параметрів датчиків навряд чи можна оперувати варіаціями цих параметрів у широких межах. Єдиним важливим моментом є необхідність вибору матеріалу з максимальним коефіцієнтом термоЕРС  $\alpha$ . Типово на рівні середніх значень 200 – 240 мкВ/К.

### Параметри термоелектричного модуля

Конструктивними параметрами термоелектричного модуля можна управляти в широких межах. Технології «РМТ» дають можливість виготовляти модулі з термоелементів у широких діапазонах перетинів і висот, різних щільностей упакування та у великому діапазоні кількості елементів.

### Форм-фактор термоелементів

Залежність абсолютної чутливості термоелектричного датчика від форм-фактора (8)

наведено в графічному виді на рис. 4. У таблиці 1 наведено значення форм-фактора типових термоелементів модулів «РМТ». Відповідно на рис. 5 позначений діапазон чутливостей датчиків теплових потоків на основі модулів «РМТ».

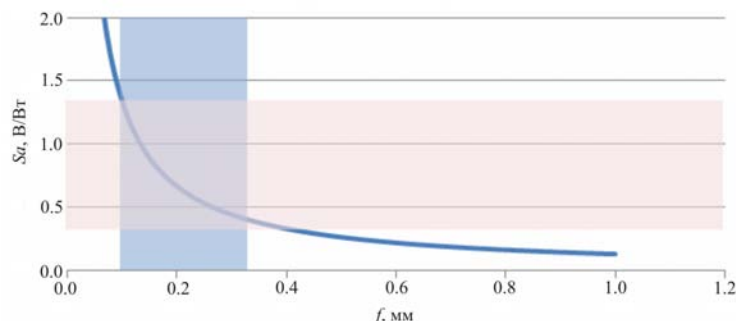


Рис. 5. Залежність чутливості термоелектричного датчика теплового потоку від форм-фактора його термоелементів.

Таблиця 1

Величини форм-факторів термоелементів у виробництві датчиків «РМТ»

Висота $h$ , мм	$f$ , мм (при заданому перетині термоелементів $a \times b$ )		
	0.2×0.2 мм	0.3×0.3 мм	0.4×0.4 мм
0.3	0.133	-	-
0.4	0.100	0.225	-
0.5	0.080	0.180	0.320
0.8	-	0.113	0.200
1.0	-	-	0.160
1.2	-	-	0.133
1.5	-	-	0.107

### Висота термоелементів

Із залежності (рис. 5) і визначення форм-фактора впливає, що за заданим перетином термоелемента чутливість датчика буде збільшуватися з ростом висоти термоелемента. Однак зі збільшенням висоти термоелемента буде зростати й постійна часу датчика, відповідно до (9). Тому одержання високих параметрів чутливості датчика з доброю швидкістю – це завдання оптимізації для конкретного застосування (рис. 6).

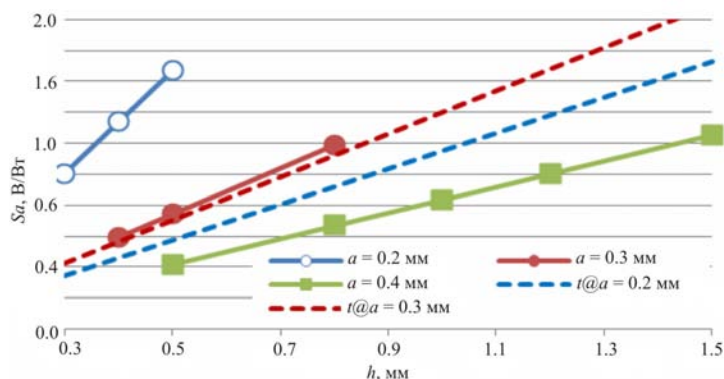


Рис. 6 Розраховані залежності чутливості  $S_a$  і постійної часу  $\tau$  від висоти термоелементів для різних перетинів: 0.2; 0.3 і 0.4 мм.



Самі швидкодіючі й чутливі датчики можливі з використанням термоелементів мінімальної перетину 0.2 мм. Висока чутливість досяжна на більших перетинах, однак при цьому зменшується швидкодія через велику висоту термоелементів.

### Розміри датчиків

Чутливість до щільності теплового потоку  $S_e$  залежить від площі приймаючої сторони датчика (2). У термоелектричному модулі – це його сторона. Розмір термоелектричного модуля визначається кількістю термоелементів, їх перетином і щільністю упакування.

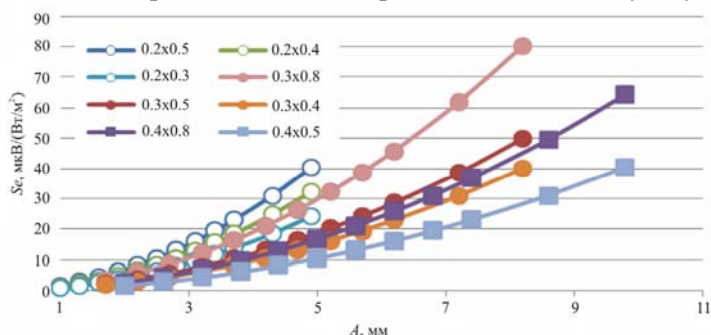


Рис. 7. Чутливість  $S_e$  термоелектричних датчиків від їх розміру A.

### Сімейство експериментальних датчиків теплового потоку

На основі наведеного вище аналізу в «PMT» було створено експериментальну лінійку датчиків теплового потоку, що складається із трьох підтипів.

HTX – датчики теплового потоку й температури (HT – Heat flux & Temperature). Датчики містять термоелектричний датчик теплового потоку й датчик середньої температури (Pt1000). Кругла форма, зовнішні сторони – алюміній із чорним покриттям. Заливка внутрішніх компонентів – силіконова.

HFX – датчики теплового потоку без температури (HF – Heat Flux). Квадратна форма, зовнішні сторони – кераміка (AlN) із чорним покриттям. Заливка внутрішніх компонентів силіконова.

HRX – датчики ІЧ радіаційного теплового потоку (HR – Heat flux Radiation). Мініатюрні термоелектричні датчики теплового потоку. Виконання – SMD під поверхневий flip-chip монтаж, квадратна форма, зовнішні сторони – кераміка, нітрид алюмінію.

### Порівняння датчиків теплового потоку

На рис. 8 у графічному вигляді наведено порівняння основних параметрів експериментальних серій датчиків теплового потоку «PMT» із показаними на ринку датчиками відомих виробників.

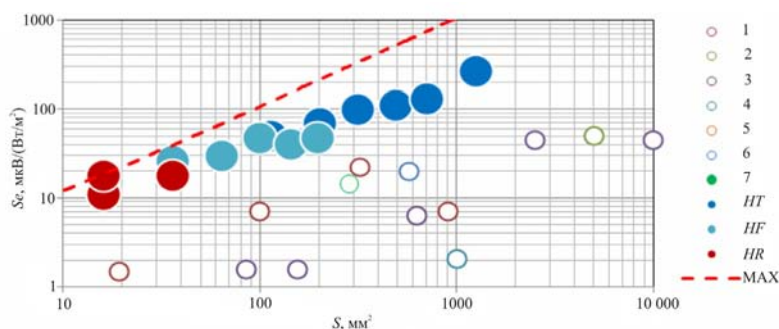


Рис. 8. Чутливості  $S_e$  датчиків теплових потоків різних виробників (1 – 7) і експериментальних серій «PMT» (HT, HF, HR), залежно від площі. Пунктир – лінія максимальних параметрів за технологією «PMT».



Датчики розроблених серій мають істотні переваги над датчиками теплових потоків відомих на ринку виробників.

1. Висока абсолютна чутливість, суттєво більш висока, ніж в датчиках на основі диференціальних термопар.
2. Мініатюрний дизайн завдяки високому ступеню інтеграції термоелементів у мікромодулях.
3. Керований коефіцієнт теплового опору завдяки гнучкості конструкції мікромодулів – керування висотою термоелементів.
4. Висока швидкодія.

## Висновки

1. Термоелектричні мікромодулі мають три вагомих напрямки застосувань за розмірами ринку та перспективами: охолодження, генерація і нове – датчики теплових потоків.
2. У напівпровідниках ефект Зеебека значно вищий, ніж у металах. Це робить застосування термоелектричних мікромодулів як датчиків теплових потоків перспективним, здатним конкурувати з датчиками на диференціальних термопарах.
3. Чутливість не залежить від кількості термоелементів. Визначається відношенням коефіцієнта термоЕРС до питомої теплопровідності й обернено пропорційна форм-факторові термоелемента.
4. Розроблений спосіб самокалібрування термоелектричних датчиків теплових потоків по  $Z$  і  $ACR$  не вимагає застосування еталонних теплових джерел, не вимагає виводу датчиків з експлуатації для процедури калібрування. Може проводитися з будь-якою періодичністю. Має високу точність.

## Література

1. T.E. Diller. Heat Flux. Copyright 2000 CRC Press LLC
2. D.J. Ortolano, F. F. Hines.. Advances Instrumentation, Vol. 38, Part II, 1983, pp. 1449 – 1456.
3. J. M. Hager, S. Onishi, L.W. Langley, T.E. Diller., AIAA J. Thermophysics Heat Transfer, 7, 1993, pp. 531 – 534.
4. J.P. Terrell. Proc. 42nd Int. Instrum. Symp., Research Triangle Park, NC: ISA, 1996, 235 – 249.
5. T. Leephakpreeda., ISA Transactions, 51(2012), pp. 345 – 350.
6. C. Mckinnon, R.R. Bernardini, W. Thresher. S.L. Ruis, D.W. Yarbrough, Ecolibrium, may 2010, p.32 – 36
7. United States Patent 4812050. Method for calibrating a heat flux gauge, 1987
8. ASTM C177 – 13. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.
9. United States Patent 3599474. Self-calibrating heat flux transducer, 1969.
10. HFP01SC. Self-calibrating heat flux sensor. (Version 1003. Hukseflux. Page 1.) [http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product\\_brochure/HFP01SC%20v1003.pdf](http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_brochure/HFP01SC%20v1003.pdf)

Надійшла до редакції 22.12.2015.