



УДК 536.62

STRUCTURAL MODEL OF A QUASI-DIFFERENTIAL CALORIMETER**СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ КВАЗИДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО КАЛОРИМЕТРА****Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й.***Dts, s.r. / д.т.н., с.н.с.*

ORCID : 0000-0001-7958-6996

Dekusha L.V. / Декуша Л.В.*Dts, s.r. / д.т.н., с.н.с.*

ORCID : 0000-0003-1881-0880

Sklyarenko E.V. / Скляренко Є.В.*Ph.d. / к.т.н.*

ORCID : 0000-0003-3952-6520

Ivanov S.O. / Іванов С.О.*Ph.d. / к.т.н.*

ORCID : 0000-0002-2722-7323

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, M. Kapnist Str., Kyiv
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. М. Капніст, 2а, Київ*

Анотація. Запропоновано структуру та передаточну блок-схему квазидиференціального калориметру, що дозволяє проводити моделювання процесів у такому приладі. Розглянуто методику налагодження мультиреферентного квазидиференціального калориметричного засобу. Як приклад, наведено стислий опис квазидиференціального бомбового калориметра КТС-4.

Ключові слова: квазидиференціальний калориметр, структурна схема, блок-схема, калориметр Тіана-Кальве.

Вступ.

Калориметричні вимірювання широко застосовуються для визначення термохімічних і теплофізичних властивостей речовин та параметрів теплообміну у різноманітних процесах [1...5]. Поширеними є калориметри теплового потоку (кондуктивні) або калориметри Тіана-Кальве [1, 5...7]. В такому калориметрі комірку з реакційною посудиною оточено чутливою теплометричною оболонкою [7...9], яка зазвичай представляє собою батарею послідовно з'єднаних термоелектричних перетворювачів (термопар) [10]. Калориметрична комірка разом з чутливою оболонкою вмонтовані в масивний термостатований блок, а вихід оболонки з'єднано з вимірювально-обчислювальною системою. Теплота, що виділяється або поглинається в комірці, проходить крізь теплометричну чутливу оболонку, в результаті чого оболонка генерує сигнал, який надходить до вимірювально-обчислювальної системи, яка здійснює його вимірювання та опрацювання даних.



Диференціальні калориметри. Зменшення впливу зовнішніх збурень та інших факторів і, відповідно, похибок вимірювань можна досягти застосуванням диференціальної схеми калориметричних вимірювань [1, 2, 7], яка представлена на рис.1.

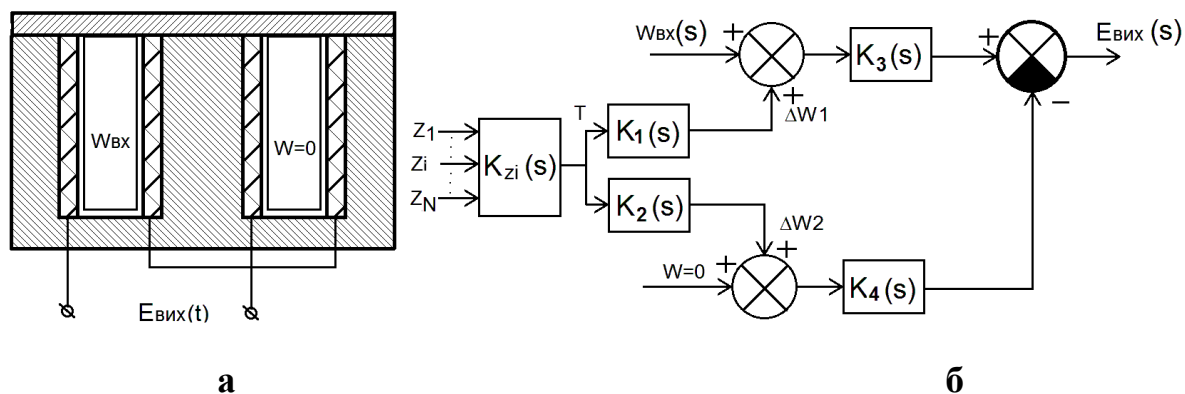


Рисунок 1. - Структура (а) та передаточна блок-схема (б) диференціального засобу для калориметричних вимірювань.

До складу диференціального калориметра, входять дві ідентичні калориметричні комірки, причому досліджуваний процес проходить тільки в одній – основній робочій реакційній комірці, а в іншій – компенсаційній комірці (або комірці-референті), корисне тепловиділення або поглинання тепла відсутні. Комірки знаходяться у загальному масивному і теплопровідному блоці, що розсіює теплоту, температура якого зазвичай підтримується стабільною або змінюваною за заданим графіком з допомогою системи терморегулювання. На блок-схемі вхідна вимірювана теплова потужність $W_{vx}(s)$, завади та збурення $Z_i(s)$, вихідний сигнал $E_{vix}(s)$ і передавальні функції ланок (елементів) представлені в області зображень за Лапласом (оператор s). Оскільки чутливі елементи комірок включені диференційно, а на обидві комірки однаково впливають зовнішні завади чи збурення, вплив цих завад на вихідний сигнал істотно зменшується і залежить лише від ідентичності комірок і чутливих елементів.

Відповідно до передаточної блок-схеми диференціального засобу калориметричних вимірювань, зображення за Лапласом вихідного сигналу можна представити формулою:



$$E_{\text{вих}}(s) = W_{\text{ex}}(s) \cdot K_3(s) + \left[\sum_{i=1}^N K_{Z_i}(s) \cdot Z_i(s) \right] \times [K_1(s) \cdot K_3(s) - K_2(s) \cdot K_4(s)] \quad (1)$$

де $Z_1(s), \dots, Z_i(s), \dots, Z_N(s)$ – зображення зовнішніх завад чи збурень;

$W_{\text{ex}}(s)$ - зображення тепловиділення від досліджуваного процесу;

$K_{Z_i}(s)$ - передаточні функції впливу зовнішніх завад на температуру загального теплорозсіюючого блоку;

$K_1(s), K_2(s), K_3(s), K_4(s)$ - передаточні функції елементів диференціального засобу вимірювань.

Якщо дві комірки диференціального калориметру виконані однаковими, тобто мають однакові передаточні функції, справедливим є співвідношення:

$$K_1(s) \cdot K_3(s) = K_2(s) \cdot K_4(s),$$

з якого випливає, що у цьому випадку друга складова у лівій частині рівняння (1) дорівнює нулю. Отже, рівняння (1) спрощується до простого виразу

$$E_{\text{вих}}(s) = W_{\text{ex}}(s) \cdot K_3(s), \quad (2)$$

або $W_{\text{ex}}(s) = \frac{E_{\text{вих}}(s)}{K_3(s)}$.

Таким чином, наявність двох комірок з однаковими характеристиками і застосування диференціальної схеми вимірювань дозволяє компенсувати вплив зовнішніх завад на вихідний сигнал, а тепловиділення від досліджуваного процесу визначати за вихідним сигналом калориметричного засобу та функцією перетворення робочої комірки.

Квазидиференціальні калориметри. Розглянута повномасштабна диференціальна схема підходить здебільшого для мікрокалориметрів, оскільки для неї характерна обмеженість верхньої границі вимірюваної теплової потужності внаслідок того, що система терморегулювання загального масивного блоку, що розсіює теплоту, не здатна відводити значну кількість теплоти, що виділяється в реакційній посудині. Крім того, наявність двох однакових комірок призводить до збільшення габаритів та маси пристрою. Ці недоліки особливо наглядно проявляються при спробі створення диференціального бомбового калориметра за класичною схемою при використанні бомб, що за розмірами



відповідають вимогам діючих стандартів до маси проб палив і об'єму бомби.

Для вирішення цього протиріччя запропоновано метод квазидиференціальної калориметрії [11, 12], на базі якого можуть бути побудовані прилади різного призначення. Такий прилад має дві комірки - основну робочу з необхідними розмірами для розміщення реакційної посудини і компенсаційну комірку значно меншого розміру, а також ланку корекції сигналу чутливого елемента компенсаційної комірки з заданою передавальною функцією і суматор сигналів.

На рис. 2 представлена загальна структура і блок-схема квазидиференціального кондуктивного калориметра.

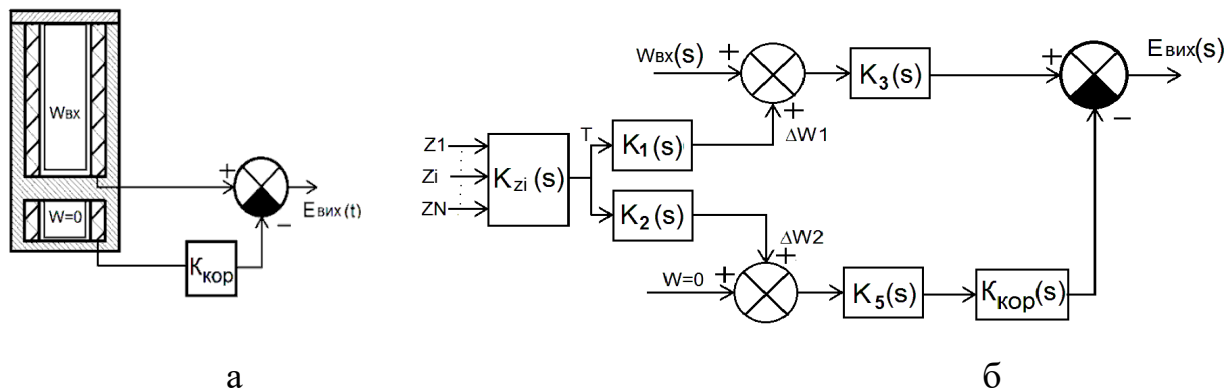


Рисунок 2. - Структура (а) і передаточна блок-схема (б) квазидиференціального засобу для калориметричних вимірювань.

Відповідно до блок-схеми рис.2 рівняння, що пов'язує вихідний сигнал з вхідними, має вигляд:

$$E_{вих}(s) = W_{вх}(s) \cdot K_3(s) + \left[\sum_{i=1}^N K_{Zi}(s) \cdot Z_i(s) \right] \times [K_1(s) \cdot K_3(s) - K_2(s) \cdot K_5(s) \cdot K_{кор}(s)] \quad (3)$$

Умовою компенсації впливу збурень на вихідний сигнал є:

$$K_1(s) \cdot K_3(s) = K_2(s) \cdot K_5(s) \cdot K_{кор}(s) ,$$

яка виконується у разі, коли передавальна функція ланки корекції сигналу компенсаційної комірки відповідає вимозі: $K_{кор}(s) = K_1(s) \cdot K_3(s) / K_2(s) \cdot K_5(s)$.

За виконання цієї умови, рівняння (3) приймає також вигляд (2).

У загальному випадку ланка корекції може комплексно впливати на характеристики ланцюга так, щоб амплітудно-частотні характеристики робочої



комірки і ланцюга комірки порівняння з коректувальною ланкою були тотожними. Проте, часто, зручно роздільно регулювати амплітудні і частотні характеристики. Застосування чутливого елемента компенсаційної комірки з такими ж питомими характеристиками, як і відповідні характеристики робочої комірки, і розміщення в компенсаційній комірці спеціального імітатора реакційної посудини може зробити подібними амплітудно-частотні характеристики сигналів чутливих елементів комірок. Тоді як коригувальна ланка може бути застосований широкосмуговий підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення. Тобто, якщо $K_1(s) \cdot K_3(s) / K_2(s) \cdot K_5(s) = const$, тоді $K_{кор}(s) = K_{кор}$.

Оскільки реакційна посудина та її імітатор мають суттєво різні розміри, для забезпечення подібності їх частотних характеристик запропоновані різні конструкції імітатору [12], у яких він складений з кількох частин, пов'язаних між собою регульованими тепловими опорами.

Квазидиференціальний кондуктивний калориметр з мультиреферентним імітатором.

Можливість забезпечення подібності частотних характеристик робочої комірки та комірки порівняння за допомогою імітатора обмежені тим, що сталі часу в складних імітаторах пов'язані між собою і не дозволяють проводити їх незалежне регулювання. Шляхом досягнення подібності частотних характеристик комірок, який забезпечує широкі можливості їх незалежного регулювання, є застосування запропонованого методу мультиреферентної квазидиференціальної калориметрії. Ідея цього методу полягає в заміні комірки-референту з єдиним складним імітатором мультиреферентною коміркою з кількома чутливими елементами, які є інерційними елементами першого порядку, сталі часу яких відповідають кореням знаменника передаточної функції робочої комірки. При цьому інерційні елементи включаються у ланцюги паралельної корекції для компенсації реакції на зовнішні завади та збурення (рис. 3).

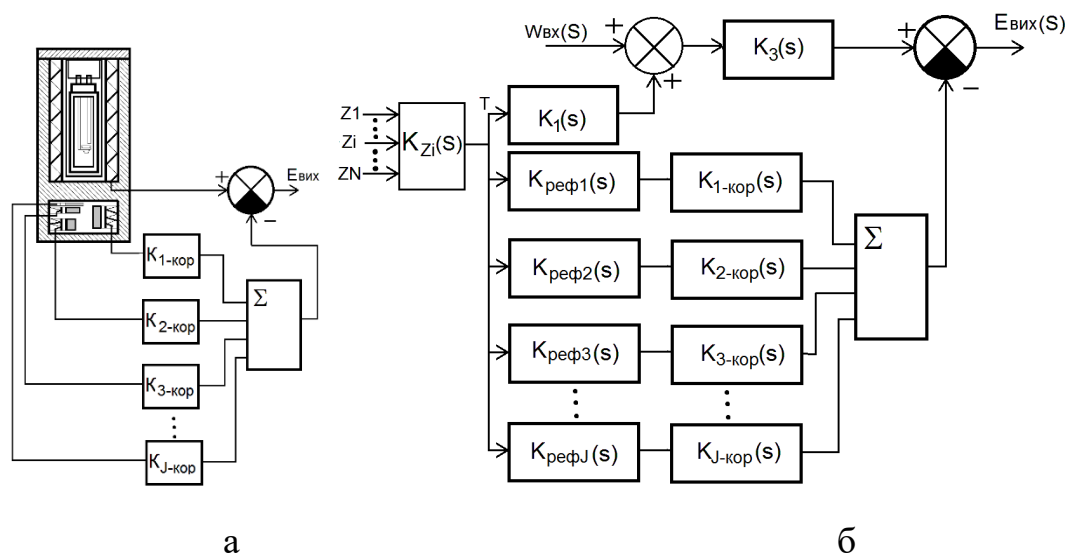


Рисунок 3. - Структура (а) і передаточна блок-схема (б)

квазідиференціального мультиреферентного засобу для калориметричних вимірювань.

Складна функція перетворення робочої комірки з реакційною посудиною у загальному вигляді може бути представлена дрібно-раціональною функцією від параметра перетворення s . Як відомо, така дрібно-раціональна функція може бути представлена як сума складників, які відповідають передаточним функціям інерційних ланок першого порядку, причому їх сталі часу відповідають кореням характеристичного рівняння передаточної функції робочої комірки.

Фізично кожна з інерційних ланок (референтів), розміщених у компенсаційній комірці, має складатися з перетворювача теплового потоку, одна з поверхонь якого контактує з теплорозсіювальним блоком, а на іншій поверхні розміщена прокладка з заданим тепловим опором, за якою встановлений теплопровідний елемент з заданою теплоємністю. На рис. 4 представлена структура референту та його схема за електротепловою аналогією.

Вхідним сигналом референту можна вважати температуру теплорозсіювального блоку, а вихідним - або температуру теплопровідного елементу і тоді ланка є інерційною (4), або перепад температури на ПТП, і тоді ланка є реальною диференціальною (5):



$$H_{Tj} = \frac{T_{ВИХ}(s)}{T_{ТБ}(s)} = \frac{1}{(R_{ПТПj} + R_{Прj}) \cdot C_j \cdot s + 1} = \frac{1}{\tau_j \cdot s + 1} ; \quad (4)$$

$$H_{\Delta Tj} = \frac{\Delta T_{qj}(s)}{T_{ТБ}(s)} = \frac{R_{ПТПj} \cdot C_j \cdot s}{(R_{ПТПj} + R_{Прj}) \cdot C_j \cdot s + 1} = \frac{k_{\Delta Tj} \cdot \tau_j \cdot s}{\tau_j \cdot s + 1} , \quad (5)$$

де $\tau_j = (R_{ПТПj} + R_{Прj}) \cdot C_j ; \quad k_{\Delta Tj} = \frac{R_{ПТПj}}{(R_{ПТПj} + R_{Прj})} \quad (6)$

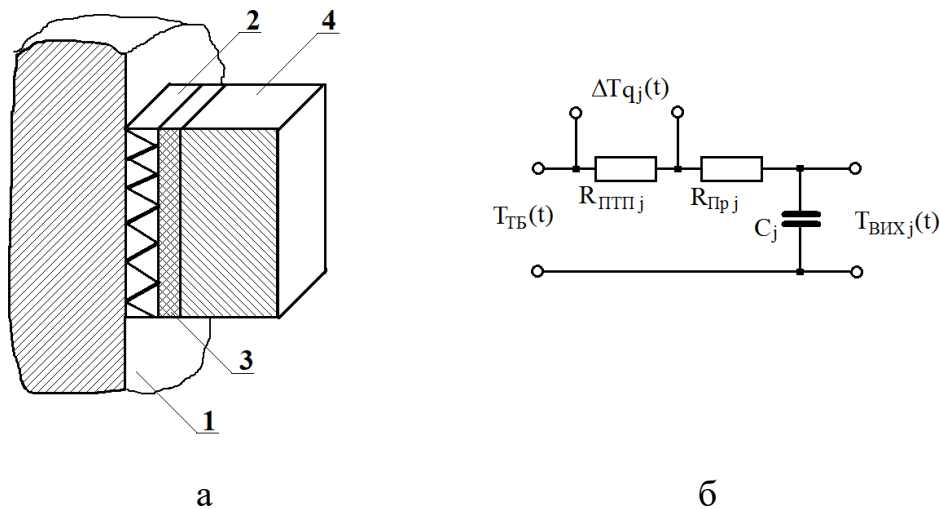


Рисунок 4. - Структура референту (а) та його схема за електротепловою аналогією (б).

1 – теплорозсіювальний блок; 2 – перетворювач теплового потоку;
3 – прокладка; 4 - теплопровідний елемент з заданою теплоємністю.

Якщо ж вихідним сигналом вважати електричний сигнал ПТП, то передаточну функцію такої реальної диференціальної ланки можна отримати з (5) і (6):

$$H_{Eqj} = \frac{E_{qj}(s)}{T_{ТБ}(s)} = \frac{F_j \cdot S_{qj} \cdot C_j \cdot s}{(R_{ПТПj} + R_{Прj}) \cdot C_j \cdot s + 1} = \frac{k_{qj} \cdot \tau_j \cdot s}{\tau_j \cdot s + 1} , \quad (7)$$

де: $k_{qj} = \frac{F_j \cdot S_{qj}}{(R_{ПТПj} + R_{Прj})} , \quad (8)$

F_j, S_{qj} - площа поверхні та питома (на одиницю поверхні) чутливість ПТП.



Стала часу таких ланок приблизно дорівнює добутку теплоємності і сумарного теплового опору перетворювача теплового потоку і прокладки. Для кожного з референтів характерним є масштабний фактор M_j , який у разі однакових питомих характеристик ПТП робочої комірки і ПТП референтів, дорівнює відношенню площ поверхонь цих ПТП.

Проектування та налагодження мультиреферентного квазідиференціального калориметричного засобу включає декілька етапів:

I. На підставі розрахунків, моделювання або експериментально визначають або амплітудно-частотну характеристику робочої комірки з реакційною посудиною, або її реакцію на ступінчасту зміну вхідного параметру, наприклад на зміну температури масивного теплорозсіюючого блоку. Наприклад, на етапі налагодження здійснюють ступеневу зміну сигналу уставки системи терморегулювання теплорозсіювального блоку калориметру на $\Delta T = 2 \dots 3$ К і реєструють при цьому функцію зміни у часі вихідного сигналу робочої комірки та температури теплорозсіювального блоку на поверхні комірки. Визначають перехідні характеристики системи терморегулювання теплорозсіювального блоку $h_{CT}(t)$ та всієї калориметричної системи $h_{KC}(t)$:

$$h_{CT}(t) = \frac{T_{TB}(t)}{\Delta T} \quad h_{KC}(t) = \frac{E_{PK}(t)}{\Delta T}, \quad (9)$$

де $T_{TB}(t)$ - температура теплорозсіювального блоку на поверхні комірки; $E_{PK}(t)$ - вихідний сигнал робочої комірки; t – час, у секундах.

II. За перехідними характеристиками відомими методами теорії автоматичного управління, наприклад, графоаналітичним методом або методом площ Сімою [13], визначають передаточні функції системи терморегулювання теплорозсіювального блоку $H_{CT}(s)$ та всієї калориметричної системи $H_{KC}(s)$, які є функціями від параметра перетворення Лапласа s .

Визначають передаточну функцію робочої комірки за формулою:

$$H_{PK}(s) = \frac{H_{KC}(s)}{H_{CT}(s)}. \quad (10)$$



Саме цю передаточну функцію $H_{PK}(s)$ використовують у подальшому для розрахунку сталих часу та коефіцієнтів пропорційності незалежних референтів.

III. Складна функція перетворення робочої комірки з реакційною посудиною у загальному вигляді може бути представлена дрібно-раціональною функцією від параметра перетворення s , причому ступінь поліному у знаменнику m повинен перевищувати ступінь поліному чисельника n . Як відомо, така дрібно-раціональна функція може бути представлена як сума m складників, які відповідають передаточним функціям інерційних ланок першого порядку, причому їх сталі часу відповідають кореням характеристичного рівняння передаточної функції робочої комірки.

$$H_{PK}(s) = \frac{a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s + 1}{b_m \cdot s^m + b_{m-1} \cdot s^{m-1} + \dots + b_1 \cdot s + 1} = \frac{G_1}{\tau_1 \cdot s + 1} + \frac{G_2}{\tau_2 \cdot s + 1} + \dots + \frac{G_m}{\tau_m \cdot s + 1}, \quad (11)$$

де a, b – коефіцієнти поліномів чисельника та знаменника функції;

G_j – вагові коефіцієнти складників розкладення;

$\tau_1 \dots \tau_m$ – сталі часу, що відповідають кореням характеристичного рівняння

$$b_m \cdot s^m + b_{m-1} \cdot s^{m-1} + \dots + b_1 \cdot s + 1 = 0. \quad (12)$$

З виразу (11) слідує, що для відтворення необхідної складної передаточної функції ланцюгів комірки порівняння достатньо в цій комірці розмістити m чутливих до завод інерційних ланок першого порядку, причому сталі часу ланок $\tau_1 \dots \tau_m$ повинні відповідати кореням характеристичного рівняння передаточної функції, а коефіцієнти підсилення ланок корекції повинні забезпечувати необхідні вагові коефіцієнти G_j при формуванні загального коректувального сигналу.

IV. Розраховують необхідні теплові опори і теплоємності інерційних ланок, чутливість їх перетворювачів теплового потоку та коефіцієнти підсилення ланок корекції, виходячи з наступних співвідношень:

- для сталої часу $\tau_j \approx (R_{ПТТj} + R_{Пpj}) \cdot C_j$, де $R_{ПТТj}$, $R_{Пpj}$ – теплові опори ПТП і теплоізоляційної прокладки референту j ; C_j – теплоємність теплопровідного елемента цього референту.

- у разі однакових питомих характеристик ПТП, значення коефіцієнтів



підсилення коректувальних підсилювачів сигналів референтів необхідно визначати за формулою: $H_{j-кор} = M_j \cdot G_j$; у разі застосування ПТП з різними

питомими значеннями чутливості $H_{j-кор} = M_j \cdot G_j \cdot \frac{S_{ПТП-ПК}}{S_{ПТП-j}}$,

де $S_{ПТП-ПК}$, $S_{ПТП-j}$ - питомі на одиницю площі чутливості ПТП робочої комірки та референту j .

V. Експериментально перевіряють відповідність перехідних характеристик робочої комірки і компенсаційної комірки з ланцюгами паралельної корекції. За необхідності, проводять корекцію характеристик, змінюючи сталі часу інерційних ланок і параметри ланок корекції.

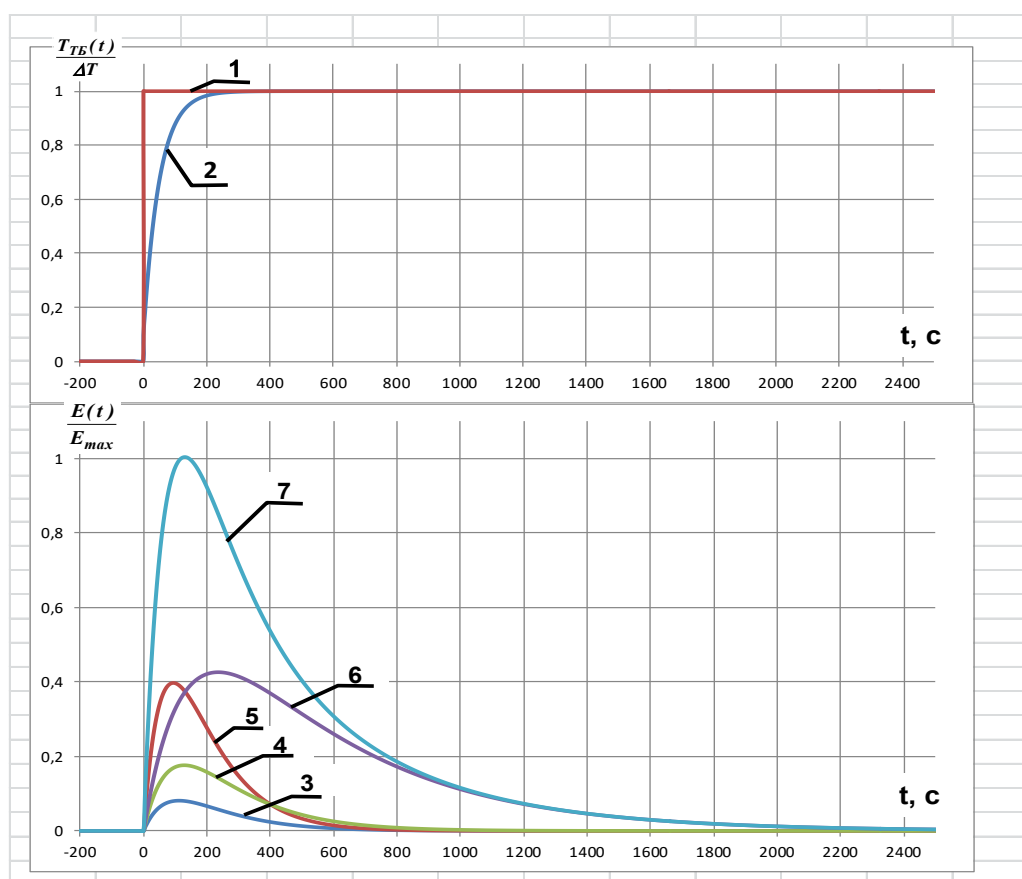


Рисунок 5. - Ілюстрація до методики налагодження мультиреферентного квазидиференціального калориметричного засобу.

На рис. 5 представлена ілюстрація до методики налагодження мультиреферентного квазидиференціального калориметричного засобу. У верхній частині рис. 5 графік 1 показує ступеневу зміну уставки температури



системи регулювання температури масивного теплорозсіювального блоку; крива 2 - зміну температури цього блоку на поверхні комірки; у нижній частині рис. 5 криві 3, 4, 5, 6 – зміна підсиленних сигналів окремих референтів, 7 - зміна сумарного корегувального сигналу, який за результатами налагодження повинен відповідати зміні сигналу робочої комірки при ступеневій зміні температури блоку.

При вимірюваннях вихідний сигнал калориметру формується як різниця сигналу чутливого елементу основної комірки і суми добутків коефіцієнтів пропорційності на сигнали чутливих елементів незалежних референтів компенсаційної комірки відповідно до формули:

$$E_{ВИХ}(t) = E_{РК}(t) - \sum_{j=1}^m H_{j-кор} \times E_j(t), \quad (13)$$

де $E_{ВИХ}(t)$ - вихідний сигнал калориметру;

$E_{РК}(t)$ - вихідний сигнал робочої комірки;

$E_j(t)$ - сигнал чутливого елементу j -того референту.

Застосування мультиреферентного квазидиференціального методу надає можливість незалежного встановлення та регулювання сталих часу і вагових коефіцієнтів складників розкладення і відповідних сигналів незалежних інерційних ланок, що дозволяє більш точно відтворювати необхідну передаточну функцію у порівнянні з квазидиференціальним методом з використанням імітатора комірки. Експериментальна перевірка показала, що застосування квазидиференціального методу з використанням імітатора комірки дозволяє знизити вплив зовнішніх збурень у 3...7 разів, а застосування мультиреферентного квазидиференціального методу дозволяє знизити цей вплив приблизно на порядок у порівнянні з однокомірковим калориметром.

Бомбовий калориметр КТС-4. У енергетиці та при наукових дослідженнях широко застосовуються бомбові калориметри для визначення теплоти згоряння палив та речовин. Розроблений в ІТТФ НАН України бомбовий калориметр КТС-4 реалізує розглянутий вище принцип квазидиференціального калориметру



теплового потоку і є робочим засобом вимірювання теплоти згоряння палива [14, 15]. Загальний вигляд КТС-4 представлена на рис. 6, а структура калориметра показана на рис. 7.



Рисунок 6. - Загальний вигляд калориметра КТС-4

Тепловий блок приладу має калориметричну чутливу оболонку, яка вмонтована в термостатований блок. В калориметричній оболонці розташована комірка та калориметрична бомба, що складається зі стакану та кришки з вентилями. Під основною калориметричною коміркою, співвісно з нею розташована додаткова компенсаційна комірка з оболонкою, яка має той же самий діаметр, конструкцію та щільність термоелементів, що й в основній оболонці, а висоту – приблизно у 10 разів меншу. У компенсаційній оболонці розміщено імітатор комірки та реакційної посудини, що має питому теплоємність на одиницю площі поверхні оболонки таку ж саму, як і вміст основної оболонки. Імітатор комірки і реакційної посудини виконаний складеним з двох або більшої кількості частин, причому між цими частинами, що складають імітатор, розташовані регульовані теплові опори. Така конструкція дозволяє шляхом підбору теплових опорів між частинами імітатору при настроюванні калориметра отримувати таку ж саму динаміку зміни сигналу компенсаційної оболонки при впливі зовнішнього збурення, як і динаміка зміни сигналу основної оболонки при впливі того ж збурення.

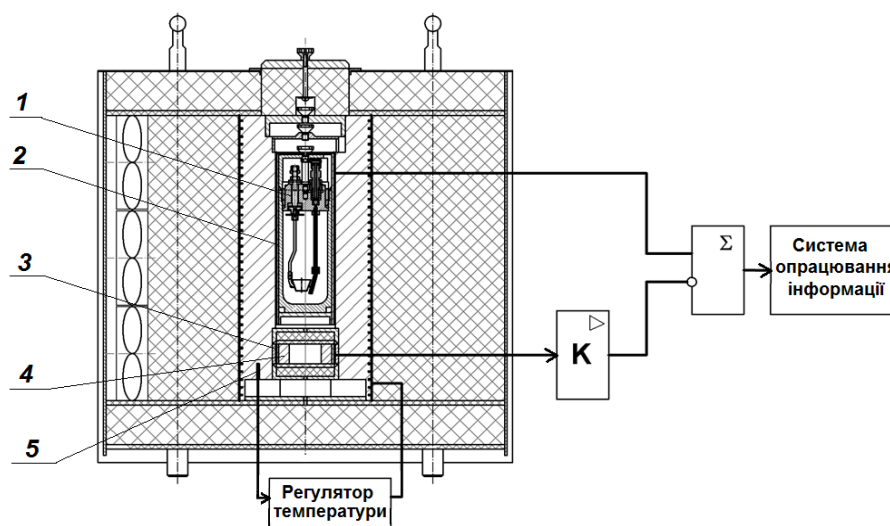


Рисунок 7. - Загальна структура квазидиференціального бомбового калориметра

- 1 – калориметрична бомба; 2 - основна калориметрична оболонка;
3 - компенсаційна оболонка; 4 - імітатор комірки та реакційної посудини;
5 – перетворювач температури*

До складу приладу, окрім згаданих теплового та електронного блоків, входять дві калориметричні бомби БКУ-2 та сервісне обладнання. Основні технічні характеристики калориметру: діапазон вимірювання кількості теплоти – від 10 до 35 кДж; похибка вимірювань – не більше $\pm 0,1\%$. Створений калориметр для визначення теплоти згоряння КТС-4 по метрологічним характеристикам не поступається закордонним робочим засобам вимірювання, а його вартість – у 3...4 рази нижча.

Висновок.

Побудова кондуктивних калориметрів за квазидиференціальною схемою дозволяє реалізувати прилади з перевагами диференціальних калориметрів, але за незначного збільшення вагових і габаритних характеристик.

Література

1. Кальве Э., Прат А. Микрокалориметрия. Применение в физической химии и биологии. Пер. с франц. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 477с.



2. Sarge S.M., Hohne G.W., Hemminger W. *Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2014. - 290 p.
3. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry. Recent Advances, Techniques and Applications*. Vol. 5. 2008. -755p.
4. Yu X. C-R. Zhou, X-W. Han, G-P. Li Study on thermodynamic properties of glyphosate by oxygen-bomb calorimeter and DSC. *J. Therm Anal Calorim.* – 2013. – Vol. 111. – № 1. – P. 943–949.
5. Salamon B. Kapała J. Gaune-Escard M. Instrumentation and calibration of the Calvet calorimeter. Enthalpy of solution of PrBr₃ at standard conditions. *J. Therm Anal Calorim.*- 2012.- vol.108: p.421–424.
6. Zielenkiewicz W. and Margas E. *Theory of Calorimetry*. Kluwer Academic Publishers: New York, Boston, 2004. - 200p.
7. Воробйов Л., Декуша Л., Грищенко Т. Батарейні перетворювачі теплового потоку для кондуктивної калориметрії. *European Science*, 2022. Issue sge12-01, P. 35-49
8. Schubert F., Gollner M., Kita J., Linseis F., Moos R. First steps to develop a sensor for a Tian–Calvet calorimeter with increased sensitivity. *J. Sens. Sens. Syst.*, 5, p.205–212, 2016. Режим доступу: www.j-sens-sens-syst.net/5/205/2016/
9. Schubert F., Gollner M., Kita J., Linseis F., Moos R. Optimization of a sensor for a Tian–Calvet calorimeter with LTCC-based sensor discs. *J. Sens. Sens. Syst.*, 5, p.381–388, 2016 . Режим доступу:www.j-sens-sens-syst.net/5/381/2016/
10. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И. и др. *Теплометрия: теория, метрология, практика. Книга 1. Методы и средства измерения теплового потока*. Киев: Ин-т технической теплофизики НАНУ, 2017. – 439с.
11. Воробьев Л.И. Декуша Л.В., Назаренко О.А., Грищенко Т.Г. Применение метода квазидифференциальной калориметрии при реализации прибора для измерения теплоты сгорания. *Промышленная теплотехника*, 2017. – №1, С. 71 – 75.
12. Декуша Л., Воробйов Л., Грищенко Т., Бурова З., Назаренко О., Мазуренко О. Квазідиференційний калориметр теплового потоку для визначення



теплоти згоряння. *Метрологія та прилади*, 2011 - № 5, С. 27-31.

13. Ерофеев А. А. Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов. СПб.: Политехника, 2003. 302 с.

14. Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива. *Инженерно-физический журнал*, 1997. - т. 70, №5, С. 828-839.

15. З.А. Бутова, М.М. Гудзенко, Л.Й. Воробйов, А.В. Макеєв. Методи та засоби дослідження енергетичної цінності харчових продуктів. - *Здоров'я людини і нації*, 2023, №2, с.34-55

Annotation. *The structure and transmission block diagram of a quasi-differential calorimeter, which allows simulation of processes in such a device, is proposed. The method of setting up a multi-reference quasi-differential calorimetric tool is considered. As an example, a brief description of the KTS-4 quasi-differential bomb calorimeter is given.*

Key words: *quasi-differential calorimeter, structural diagram, block diagram, Tian-Calve calorimeter.*

*Стаття підготовлена в рамках наукової роботи №: 1.7.1.896
"Розвиток методів та засобів підвищення екологоенергетичної
ефективності в газотурбобудуванні та теплоенергетиці"*

Стаття відправлена: 20.09.2024 г.