

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

ЛУПИНА БОРИС ІВАНОВИЧ

УДК 621.382

МІКРОМЕХАНІЧНІ ТЕРМОРЕЗИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Спеціальність 05.27.01 – твердотільна електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, професор

Борисов Олександр Васильович

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського”, в. о. завідувача кафедри
мікроелектроніки, професор кафедри
мікроелектроніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Дружинін Анатолій Олександрович

Національний університет «Львівська
політехніка»

завідувач кафедри напівпровідникової
електроніки

доктор технічних наук, професор

Осадчук Володимир Степанович

Вінницький Національний технічний
університет

професор кафедри радіотехніки

Захист відбудеться “19” квітня 2017 р. о 14 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, Київ, пр. Перемоги, 37, корпус №12, ауд. 412.

З дисертацією можна познайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “_____” березня 2017 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08



В.Г. Артюхов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток електронного приладобудування і промислових технологій обумовлює зростаючу потребу у первинних перетворювачах (ПП) фізичних величин і одночасно вимагає оптимізації їх застосування у вимірювальних пристроях. Крім традиційних вимог (широкий вимірювальний діапазон, надійність, низька собівартість, можливість заміни без наступного калібрування вторинного перетворювача) до сучасних ПП висувуються вимоги сумісності з технологіями мікроелектроніки, низького енергоспоживання, малих габаритів та маси. Ефективний і якісно новий напрямок у розробці та виробництві ПП фізичних величин відкривають електронні технології виготовлення мікроелектромеханічних систем (MEMS) на монокристалічному кремнії. Використання анізотропного травлення дозволяє здійснити перехід від традиційної площинної конструкції твердотілого електронного елементу до об'ємної та отримати потрібну (за необхідності – тривимірну) геометричну форму ПП. Перетворення фізичної величини в електричний сигнал в таких пристроях реалізується як з використанням кремнію, так і інших традиційних для мікроелектроніки матеріалів, наприклад, металів – для створення термочутливих елементів (ТЧЕ) терморезисторних первинних перетворювачів (ТРПП) і діелектриків – для електричної та теплової ізоляції. Розробка сенсорів та виконавчих пристроїв за технологією MEMS – самостійна галузь сучасної мікроелектроніки.

Значна частина MEMS ТРПП функціонує на засадах електротеплових перетворень і передбачає створення заданих температурних градієнтів в термоізованій структурі (ТІС) та контроль теплообміну між окремими її елементами і оточуючим середовищем. Розробка електронних пристроїв на основі твердотілих ТРПП потребує комплексної постановки задачі з розглядом електричних і теплофізичних процесів безпосередньо в ТІС та теплофізичних і гідродинамічних процесів в середовищі. Наявність зворотного електротеплового зв'язку між процесами в первинному і вторинному перетворювачах вимагає аналізу проходження сигналу в електричних колах. Теоретичні засади розробки ТРПП у MEMS виконанні, оптимізації їх конструкцій та електронних схем вторинних перетворювачів розглянуті на сьогоднішній день не достатньо і є предметом активних наукових досліджень. Експериментальні дані щодо теплообміну об'єктів з розмірами в діапазоні 1 мкм – 1 мм є не повними та часто – суперечливими. При розв'язанні прикладних задач розробники зазвичай уникають аналізу фізичних процесів в ТРПП і їх аналітичного моделювання, обмежуючись використанням комерційних програм для чисельного моделювання (ANSYS та COMSOL Multiphysics).

Необхідність поглибленого дослідження ТРПП у виконанні MEMS викликана відсутністю простих і доступних для інженерного аналізу аналітичних розв'язків рівняння теплопровідності для реальних конструкцій ТІС. Дослідження ТРПП у MEMS виконанні, оптимізація їх вимірювальних характеристик є актуальними та визначають як наукову, так і практичну цінність роботи. Поглиблення наукових фізико-технічних уявлень про зв'язок конструктивних характеристик ТРПП і їх параметрів перетворення з метою формування інженерних підходів до проектування перетворювача на заданий вимірювальний діапазон – основне наукове завдання проведених досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тема дисертаційної роботи пов'язана з науковою діяльністю колективу кафедри мікроелектроніки і лабораторії медичної сенсорики факультету

електроніки КПП ім. Ігоря Сікорського в області розвитку сучасних підходів до проектування твердотільних ТРПП за технологіями МЕМС та електронних схем вторинних перетворювачів до них. Принципи та методи розрахунку характеристик таких електронних пристроїв використані при виконанні:

- державної науково-технічної програми “Розробка технологій та організація виробництва напівпровідникових мікросенсорів, електронних приладів та систем на їх основі для екологічного моніторингу та енергозбереження. Розробка та створення міждисциплінарних інтелектуальних продуктів: матеріалів, приладів, інформаційних систем для базових секторів економіки” (державний реєстраційний номер 0106U007388);
- науково-дослідної роботи «Розробка теорії ідентифікації параметрів біологічних об’єктів сільськогосподарського призначення та побудови інтелектуальних сенсорних систем для її визначення» (державний реєстраційний номер 0111U008208).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертації - розробка ТРПП за технологіями МЕМС і встановлення фізико-технічних і конструктивних закономірностей зв’язку їх електричних і температурних характеристик із параметрами оточуючого середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати наступні задачі:

- провести порівняльний аналіз існуючих конструкцій, метрологічних показників і методів первинного перетворення традиційних об’ємних ТРПП, сучасних тонкоплівкових ТРПП і виготовлених за технологією МЕМС;
- обґрунтувати вибір напрямку розробки та запропонувати способи виготовлення ТРПП у МЕМС виконанні, що ефективно використовують їх конструктивно-топологічні переваги над об’ємними аналогами;
- дослідити фізико-технічні закономірності впливу конструктивних характеристик твердотільних ТІС на функції перетворення калориметричного занурювального та поверхневого ТРПП лінійної швидкості (об’ємних витрат) рідини та газу і абсолютного тиску газу типу Пірані;
- дослідити функції перетворення активних твердотільних ТРПП динамічного нагрівання та запропонувати способи вимірювання теплофізичних параметрів середовища, що використовують специфіку в конструктивно-топологічних аспектах ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС;
- виконати компенсацію температурної залежності характеристики перетворення на прикладі ТРПП вакууму типу Пірані;
- провести апробацію ТРПП лінійної швидкості (об’ємних витрат) газу в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини.

Об’єктом дослідження є терморезисторні первинні перетворювачі, виготовлені за технологією МЕМС, та вторинні перетворювачі для них.

Предметом дослідження є топологічна структура і теплові режими роботи твердотільних ТРПП, які визначають функціональні залежності їх електричних характеристик від параметрів оточуючого середовища.

Методи досліджень. Розв’язання поставлених задач виконувались з використанням наступних методів: аналітичного розв’язку лінійних диференціальних рівнянь; математичної фізики та чисельного моделювання; теорії електричних кіл; термоанемометричних, зондових, кондуктометричних і калориметричних методів визначення фізичних параметрів середовища.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає у визначенні принципів розробки терморезисторних первинних перетворювачів за технологією МЕМС на кремнії і встановленні закономірностей впливу їх фізико

- топологічних характеристик на метрологічні параметри. В дисертації одержані такі нові наукові результати:

1. Встановлено особливості протікання процесів теплообміну між елементами теплоізованої структури у МЕМС виконанні і навколишнім середовищем, на основі чого розроблено нові терморезисторні перетворювачі з удосконаленою конструкцією. Визначено закономірності впливу конструктивно-топологічних характеристик на метрологічні параметри для триелементного місткового перетворювача лінійної швидкості газу занурюваного і поверхневого типів. Аналітично конкретизовано та методами чисельного експерименту обґрунтовано перевагу в чутливості багатоелементних калориметричних перетворювачів лінійної швидкості над одноелементними термоанемометричними.

2. Набула подальшого розвитку модель поверхневого перетворювача лінійної швидкості рідини або газу, вмонтованого в стінку потокоформуючого каналу. Автором вперше проведено аналіз впливу на характеристику перетворення теплообміну зі зворотного боку мембранної теплоізованої структури, вмонтованої в стінку потокоформуючого каналу, що дозволяє розробити ТРПП на заданий діапазон чутливості.

3. Запропоновано та розроблено нові пристрої з вимірювання параметрів газового середовища з використанням методів динамічного нагрівання, які дозволяють використати переваги в конструктивно-технологічних особливостях перетворювачів, виготовлених за технологією МЕМС. Показано, що технології МЕМС надають переваги в конструкціях зондових елементів динамічного нагрівання, оскільки дозволяють реалізовувати активні теплоізовані структури істотно виродженої геометрії з відношенням характерного розміру тіла теплообміну до сумарної товщини теплогенеруючого елемента понад 50.

4. Встановлено закономірності впливу зміни температури середовища на вимірювальну характеристику терморезисторного перетворювача активного нагрівання в самозбалансованих місткових схемах, що дало змогу розробити новий спосіб компенсації температурної чутливості за методом модуляції напруги живлення термогенеруючого елемента.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи є теоретичною та експериментальною базою для розробки ТРПП за технологією МЕМС для контролю температури, лінійної швидкості, об'ємних витрат та теплофізичних параметрів газового середовища і рідини з конструктивно керованими характеристиками перетворення.

Проведено впровадження розроблених ТРПП в діагностичний прилад медичного призначення "Комплекс автоматизований для дослідження функції зовнішнього дихання ПУЛЬМОВЕНТ", ТУ У 19018095.001-96, виробник - ТОВ "Сенсорні системи" (Київ). Результати роботи використовуються в навчальному процесі на факультеті електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського за програмою підготовки фахівців кваліфікаційного рівня «Бакалавр» (6.05.08.01) та «Магістр» за спеціальністю 153: мікро- та наносистемна техніка.

Особистий внесок здобувача в отримання наукових результатів. В дисертаційній роботі узагальнено результати досліджень, що виконані автором особисто, а також спільно з колективом кафедри мікроелектроніки і лабораторії медичної сенсорики факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського та у співробітництві з ТОВ "Сенсорні системи" (Київ). Здобувач брав участь у розробці конструкцій ТРПП, методик визначення їх характеристик, розробці

математичних моделей та методик визначення параметрів середовища. В спільних наукових роботах здобувач особисто виконав наступні роботи:

- виконав аналіз сучасних конструкцій ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС, сучасних підходів до створення математичних моделей місткових і мембранних ТРПП, методів первинного перетворювання параметрів середовища і обґрунтував вибір напрямку наукових досліджень [2, 3, 6-9, 10-16, 21, 22, 25-28];
- отримав та проаналізував теплові та вольт-амперні характеристики мембранних МЕМС ТРПП, розроблених в лабораторії медичної сенсорики факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського у співробітництві з ТОВ “Сенсорні системи” [2, 5, 6, 17, 18, 24, 25];
- методами аналітичного моделювання та чисельного експерименту удосконалив принципи керування параметрами перетворення МЕМС ТРПП за рахунок топології ТІС та геометрії корпусу [3, 14, 16, 19, 20];
- розробив методику експериментальних досліджень макетних зразків ТРПП активного нагрівання з використанням сучасних апаратних і програмних засобів (промислових плат збору даних, середовища програмування LabVIEW) [2, 17, 18];
- виконав теоретичні та експериментальні дослідження МЕМС перетворювачів вакууму типу Пірані і лінійної швидкості (об’ємних витрат) газу для їх наступного застосування в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини [4, 5, 8, 23-25].

Інтерпретацію отриманих результатів, формулювання основних положень і висновків по роботі проведено спільно з науковим керівником.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідалися й обговорювалися на наступних наукових конференціях:

1. ESSDERC '96, 26th European Solid State Device Research Conference, Bologna, Italy, 9-11 September 1996. The 2-nd Thermionic Workshop, September 25-27, 1996, Budapest, Hungary.
2. The 1996 International Mechanical Engineering congress and exposition, November 17-22, 1996, Atlanta, Georgia, USA.
3. Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми фізичної та біомедичної електроніки”, 28-30 травня 1998р, Київ, Україна.
4. 5-я Международная конференция "Теория и техника передачи, приема и обработки информации", Харьков, 1999 г.
5. Workshop “Microtechniken und Mikrosensoren fur die Medizin, Biologie und Umwelt”, Jena 6- 7. Oktober 2000.
6. 2-й, 3-й и 5-й Международный радиоэлектронный форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития”. Харьков, Украина, 19-23 сентября 2005 г., Харьков-Судак, Украина, 22-24 октября 2008 г., Харьков, Украина, 14-17 октября 2014 г.
7. Международная научно-техническая конференция “Датчики, Приборы и Системы - 2007”, Ялта, 16-22 Сентября 2007 г.
8. XXX та XXXI Міжнародна науково-технічна конференція ”Електроніка та нанотехнології”, м. Київ, Україна, 13-15 квітня 2010 р. і 12-14 квітня 2011 р.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 28 наукових праць, у тому числі 9 - у фахових журналах (з них 1 стаття у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ, 4 патенти на винахід, 2 патенти на корисну модель, 13 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів із висновками, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 186 найменувань на 22 сторінках, додатку. Загальний обсяг дисертації становить 169 сторінок. Робота містить 52 рисунки та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми і необхідність проведення досліджень, сформульовано мету та завдання роботи, відмічено її наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про апробацію і публікацію основних положень дисертаційної роботи, а також про особистий вклад здобувача в отримання результатів.

У першому розділі проведено аналіз стану розробки і застосування ТРПП, виготовлених за традиційними технологіями (дротяні та тонкоплівкові ТРПП із платини, міді та нікелю на діелектричних підкладках) і за сучасною технологією МЕМС. Проведено огляд конструкцій вказаних пристроїв та їх аналіз, що дозволив визначити існуючі проблеми і поставити основні задачі дисертаційної роботи. Показано, що за комплексом метрологічних характеристик сучасні МЕМС ТРПП перевершили об'ємні аналоги за пороговими, частотними та енерговитратними характеристиками. Рекордно мала тепломність ТІС, високий ступінь теплової ізоляції від корпусу, швидкодія порядку мілісекунд, споживана потужність на рівні міліват дають можливості розробки нових методів перетворення, реалізація яких в об'ємних структурах принципово неможлива. Визначено основні не розв'язані на поточний момент задачі:

а) відсутні бібліотеки математичних електро-теплових моделей елементів ТІС типової геометрії (консолі, містка, мембрани);
 б) відсутні інженерні методики реалізації заданих електричних і теплових режимів багатоеlementних ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС;
 в) в нормативних технічних документах недостатньо чітко прописані перелік і метрологічно узгоджені методики експериментального визначення технічних параметрів ТІС багатоеlementних ТРПП стороннього нагрівання.

Вищевказане є підтвердженням актуальності проведення наукових робіт у вибраному напрямку з метою формування інженерних підходів до розробки електронних пристроїв на основі ТРПП у МЕМС виконанні.

У другому розділі розглянуто технологічні аспекти виготовлення ТРПП за технологією МЕМС. Основою ТРПП є пластина монокристалічного кремнію орієнтації $\langle 100 \rangle$ з шарами діелектриків: отриманим методом термічного окислення шаром SiO_2 товщиною 0,05-0,1 мкм та нанесеним методом парогазового осадження шаром нітриду кремнію Si_3N_4 товщиною 0,2-0,3 мкм. З переднього боку пластини методами фотолітографії та травлення формуються плівкові нікелеві резистори. Вказані технологічні операції є базовими для КМОН технології. Особливістю технології виготовлення ТІС є використання двохсторонньої фотолітографії, що дозволяє сформувати вікна в діелектрику на зворотному боці пластини для наступного анізотропного травлення кремнію наскрізь в розчині KOH з метою формування діелектричних мембран під резисторами переднього боку. Фото фрагментів кремнієвих пластин із сформованими мембранними ТІС наведено на рис. 1.

В результаті проведення описаних технологічних операцій діелектрична мембрана із сформованими на ній металевими терморезисторами залишається завислою по периметру на кремнієвій підкладці над порожниною травлення. Вироджена планарна геометрія (відношення лінійних розмірів мембрани до її

товщини порядку 500:1) та властивості діелектричних матеріалів двошарової $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ мембрани одночасно забезпечують надійний тепловий контакт розміщених на ній резисторів з навколишнім середовищем та їх термоізоляцію від монокристалічної кремнієвої підкладки, що є необхідною умовою для подальшого функціонування ТРПП активного нагрівання.

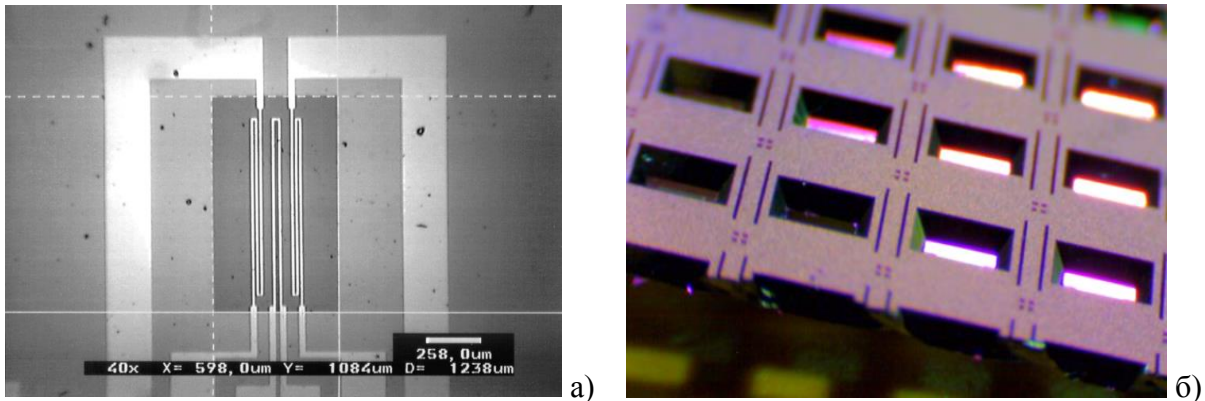


Рис. 1 Мембранні теплоізоляовані структури лабораторії медичної сенсорики ФЕЛ КПІ ім. Ігоря Сікорського, виготовлені методом анізотропного травлення кремнію; а) – вигляд з переднього боку, б) - зворотний вигляд.

Використання матриць ТІС в багатофункціональних ТРПП вимагає забезпечення підвищеної теплової ізоляції окремих ТІС, сформованих на одній підкладці. Для розв'язання цієї задачі та з метою усунення безпосереднього контакту ТІС з монокристалічним кремнієм запропоновано додатково з переднього боку пластини плазмохімічним травленням сформувати вікна в плівці нітриду кремнію, через які в підкладці по периметру мембрани сформувати ізолюючий окисел SiO_2 . Після проведення двосторонньої фотолітографії, формування ТЧЕ і вікон для проведення анізотропного травлення із зворотного боку отримують структури ТІС з прошарком діелектрику по периметру кожної мембрани. Товщина ізолюючого окислу 1,0 - 1,5 мкм обрана з умови, що при температурі, близькій до 1100 °С, відбудеться окислення підкладки монокристалічного кремнію на глибину 0,3-0,5 мкм, в результаті чого при виконанні анізотропного травлення із зворотного боку буде видалено ділянки кремнію, які створювали теплові канали для кондуктивного теплообміну між теплогенеруючим елементом (ТГЕ) та підкладкою.

В розділі проведено дослідження характеру процесів теплообміну між елементами ТІС та оточуючим середовищем на феноменологічних засадах. Проведений аналіз критеріальних рівнянь для мікромеханічних ТРПП місткової і мембранної геометрій на основі теорії подібності для актуальних для роботи середовищ показав, що основним механізмом теплообміну є теплопровідність.

Аналіз конструкцій ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС, проведено шляхом поділу ТІС на однорідні області за характерними ознаками тепловиділення і теплообміну. До складу кожного активного ТРПП входить ТГЕ із заданою об'ємною густиною теплової потужності. Прикладом такого ТГЕ може бути область резистивного елемента, де відбувається виділення джоулевого тепла внаслідок живлення ТРПП електричним струмом. Для кожної з областей ТІС встановлено умови кондуктивно-конвективного теплообміну з середовищем, а також умови теплообміну із суміжними областями і з корпусом теплопровідністю на спільних межах. ТГЕ, ТЧЕ та пасивні області ТІС спрощено аналізуються як набір фізично однорідних в теплофізичному аспекті

областей, геометричні та теплофізичні параметри яких визначаються прошарками та наводяться як ефективні, виходячи із геометрії елемента та фізичних характеристик матеріалів. В розрахунках просторового розподілу температури $T_j(x,y)$ для кожного типу області j вводяться еквівалентні параметри товщини $d_e^{(j)}$, теплопровідності $k_e^{(j)}$, густини $\gamma_e^{(j)}$ та питомої теплоємності $C_e^{(j)}$. Для кожної з виділених однорідних областей ТІС у двовимірній постановці задачі записано узагальнене рівняння теплообміну:

$$k_e^{(j)} d_e^{(j)} \frac{\partial^2 T_j}{\partial x_j^2} + k_e^{(j)} d_e^{(j)} \frac{\partial^2 T_j}{\partial y_j^2} = -q_j + H_j (T_j - T_c) + C_e^{(j)} \gamma_e^{(j)} d_e^{(j)} \frac{\partial T_j}{\partial t}, \quad (1)$$

де $q_j(x,y)$ - площинна густина потужності джерел тепловиділення в області j ; H_j коефіцієнт теплообміну з поверхні; T_c - температура середовища

Із (1) отримано залежність теплового опору середовища і коефіцієнту теплообміну $H(b,D,k)$ [Вт/(°C·м²)] з поверхні місткового ТГЕ шириною b і довжиною L в каналі прямокутного поперечного перерізу висотою $2D$:

$$H(b,D,k) = \frac{k}{4D \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \sin(\lambda_m)}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} \left\{ 1 + \frac{D}{b \sigma_{n,m}} (\exp[-\sigma_{n,m} \frac{b}{D}] - 1) \right\}}, \quad (2)$$

де $\lambda_n = \frac{\pi}{2}(2n+1)$, $\lambda_m = \frac{\pi}{2}(2m+1)$; $\sigma_{n,m} = \sqrt{(\lambda_n)^2 + (\frac{2D}{L})^2 (\lambda_m)^2}$.

Розрахункові залежності теплового опору заповненого повітрям каналу від його висоти і ширини місткового ТГЕ наведено на рис. 2. Вплив конструктивних параметрів корпусу ТРПП і теплофізичних параметрів середовища в каналі на температуру перегріву ТГЕ відносно середовища визначено через параметр розсіювання потужності G_{th} [Вт/°C] і сумарний тепловий опір R_{th} [°C/Вт].

За результатами проведених розрахунків показано наступне:

1. Для каналів висотою $2D \leq 600$ мкм характерний близький до лінійного розподіл температури по висоті каналу над ТГЕ шириною близько 40 мкм, що забезпечує ефективне накладання профілів температури та швидкості середовища в каналі.

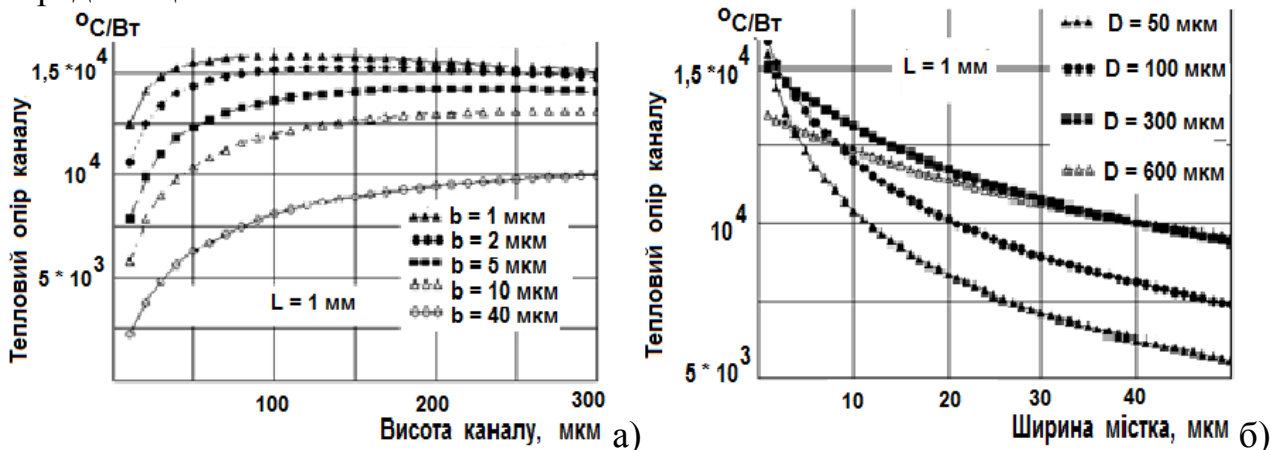


Рис. 2 Розрахункова залежність теплового опору заповненого повітрям каналу прямокутного перерізу від: а) - висоти каналу; б) - ширини містка.

2. При висоті каналу понад 300 мкм ширина ТГЕ не є визначальною для температури його перегріву при заданій потужності: зміна ширини ТГЕ в 100 разів від 1 мкм до 100 мкм призводить до зміни його температури близько 10%.

3. Збільшення висоти каналу в 20 разів (з 50 мкм до 1 мм) призводить до збільшення теплового опору R_{th} 1,5 рази. Доцільно вибирати висоту каналу понад 200 мкм, коли залежність температури нагрівача від висоти каналу незначна, а технологічне відхилення висоти каналу від номінального значення слабо впливає на температуру ТГЕ.

У третьому розділі виконано аналіз методів визначення механічних і теплофізичних параметрів середовища. Проведено розрахунки характеристики перетворення для занурювального та поверхневого варіанту розміщення ТРПП в потокоформуючому каналі. Для занурювального ТРПП аналітично доведено, що збільшення висоти каналу в режимі сталої потужності ТГЕ призводить до істотного підвищення чутливості до швидкості потоку з одночасним звуженням діапазону його монотонної зміни. Для ТГЕ шириною b в діапазоні 10 – 100 мкм висота каналу D в 200 – 300 мкм є перехідною від зони “сильної” залежності температури нагрівача від висоти каналу до зони “слабкої”. Сильна залежність ($D < 100$ мкм) характерна для сумірних значень висоти каналу і ширини ТГЕ.

Для триелементного калориметричного ТРПП аналітично визначено діапазони монотонної залежності різниці температур ТЧЕ від швидкості середовища в каналі, що визначаються відношенням відстані між ТГЕ до висоти каналу, тобто є конструктивно керованими. Графічні результати для розташованого впоперек каналу ТГЕ прямокутної форми довжиною $L=1$ мм, шириною $b=20$ мкм наведено на рис. 3; канал висотою $2D=600$ мкм. В розділі аналітично показано, що чутливість такого ТРПП в 2,5 рази вища за чутливість одноелементного анемометричного аналога за середнього значення лінійної швидкості повітря в каналі близько 0,1 м/с.

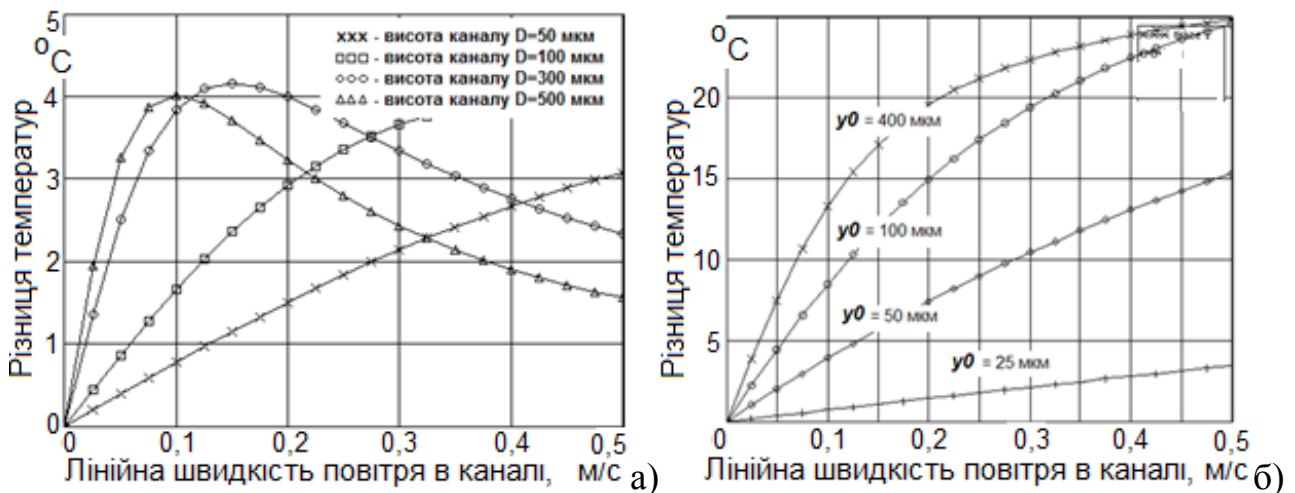


Рис. 3 Розрахункова залежність різниці температур між точками вздовж каналу від лінійної швидкості повітря. а) - точки рівновіддалені від центру нагрівача на відстань, рівну половині висоти каналу, $P_h = 1$ мВт; б) - точки рівновіддалені на відстань y_0 від центру нагрівача, $P_h = 3$ мВт,).

Ескіз поверхневого варіанту монтажу мембранного ТРПП наведено на рис. 4 а), б). В розділі отримано рівняння теплообміну мембранної ТІС в наближенні лінійного розподілу температури середовища по висоті каналу над ТГЕ:

$$\left(\frac{1}{2} + \frac{k_m \cdot d_m}{k_{fl} \cdot D_\epsilon}\right) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{V_y}{2a_{fl}} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{H_\epsilon + H_n}{k_{fl} \cdot D_\epsilon} T = \frac{P_h / (bL)}{k_{fl} \cdot D_\epsilon}, \quad (3)$$

де k_m , d_m – відповідно теплопровідність і товщина мембрани, k_{fl} , a_{fl} – теплопровідність і температуропровідність середовища в каналі; D_ϵ і D_n – висота каналу і відстань від ТГЕ до нижньої поверхні теплообміну, V_y – середня лінійна швидкість середовища, P_h – потужність ТГЕ шириною b і довжиною L .

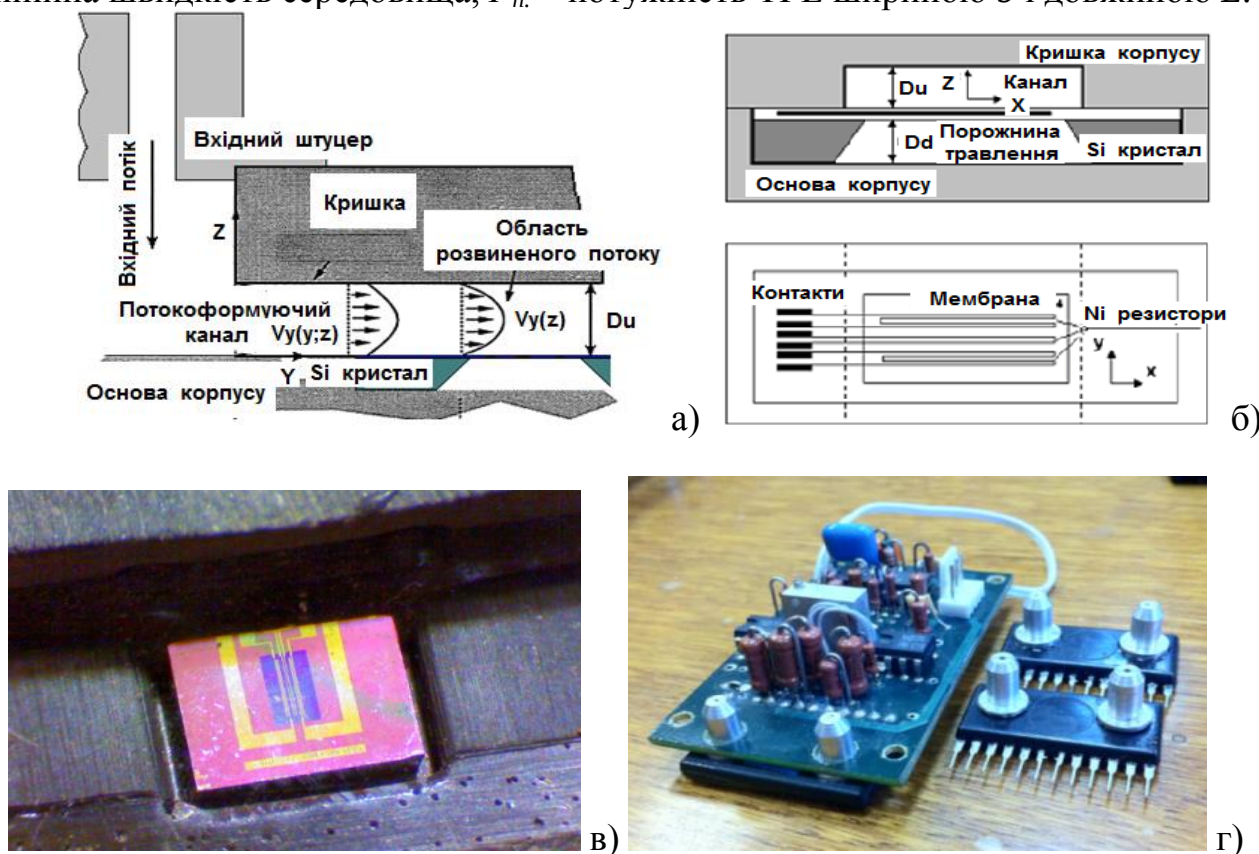


Рис. 4 Мембранний ТРПП лінійної швидкості середовища поверхневого типу.

а), б) – ескізи до побудови моделі, в) - фото перетворювача, вмонтованого врівень зі стінкою потокоформуючого каналу, г) - фото вторинного перетворювача та зразків корпусу.

Розв'язок (3) отримано для температури в площині мембрани ТРПП для зон мембрани до ТГЕ $T_1(y_1)$, над ним T_h та після нього $T_3(y_3)$:

$$T_1(y_1) = T_h \exp\left[\lambda_1 \left(y_1 + \frac{b}{2}\right)\right];$$

$$T_h = \frac{P_h}{b \cdot L \cdot \left[\frac{k_{fl}}{D_\epsilon} + \frac{k_{air}}{D_n}\right] + D_\epsilon L \cdot (C \cdot \gamma)_{fl} \sqrt{V^2 + 16a_{fl}^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{k_m \cdot d_m}{k_{fl} \cdot D_\epsilon}\right) \left(\frac{H_\epsilon + H_n}{k_{fl} \cdot D_\epsilon}\right)}}; \quad (4)$$

$$T3(y3) = T_h \exp\left\{\lambda_2\left(y3 - \frac{b}{2}\right)\right\},$$

де $y1 \in -\infty \div -\frac{b}{2}; -\frac{b}{2} \leq y2 \leq \frac{b}{2}; y3 \in \frac{b}{2} \div \infty$; T_h – температура ТГЕ, k_{air} – теплопровідність повітря в порожнині травлення під мембраною,

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{4a_{fl} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{k_M \cdot d_M}{k_{fl} \cdot D_s}\right)} \left[V \pm \sqrt{V^2 + 16a_{fl}^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{k_M \cdot d_M}{k_{fl} \cdot D_s}\right) \left(\frac{H_s + H_n}{k_{fl} \cdot D_s}\right)} \right]. \quad (5)$$

Виконані за (4) результати розрахунку температури в площині мембрани поверхневого ТРПП наведено на рис. 5. Розрахунковий результат відповідає експериментально виміряним чисельним значенням для досліджених в роботі ТРПП ($R_{th} = 10^4$ °C/Вт в повітрі за нормальних кліматичних умов).

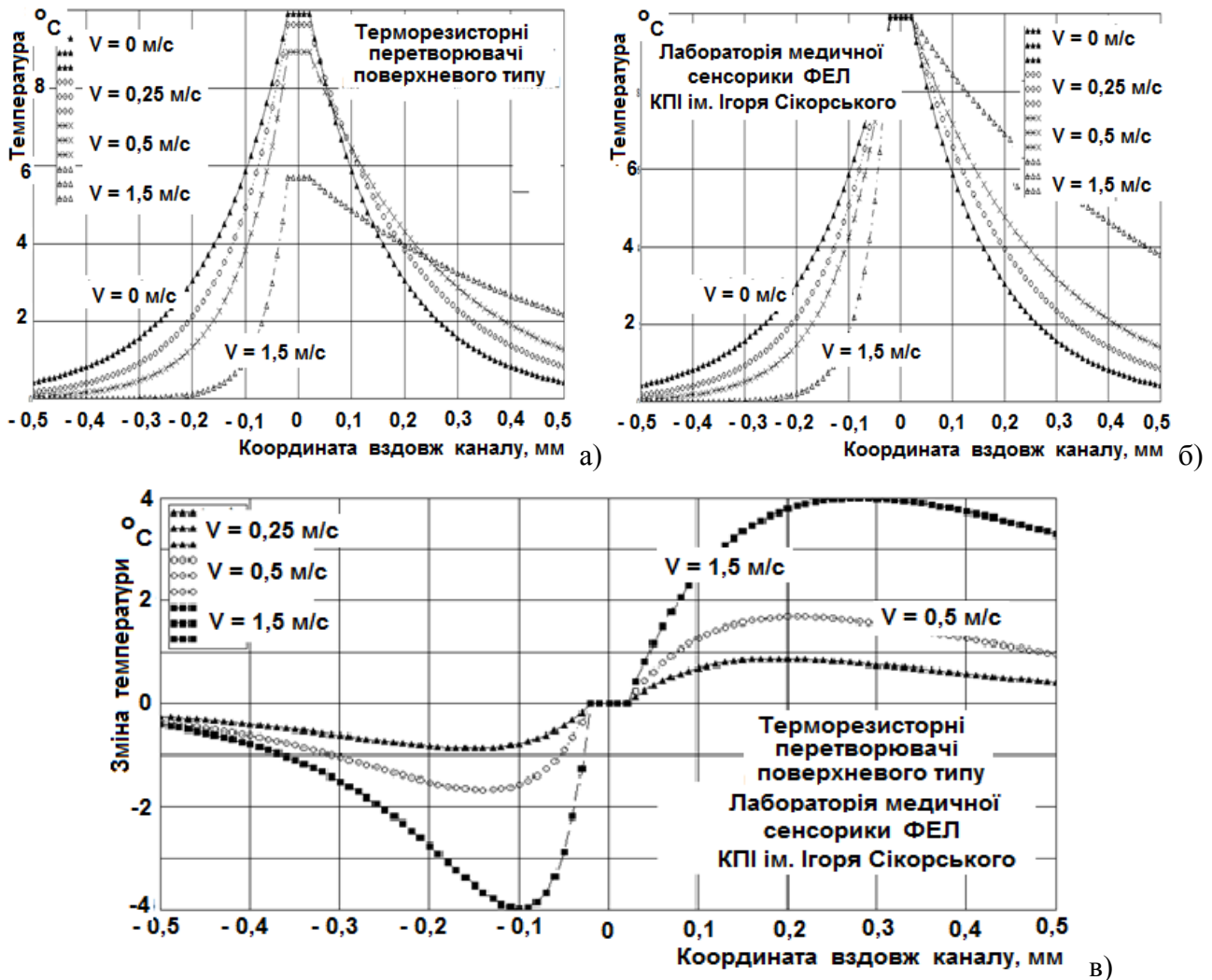


Рис. 5 Розрахункова залежність розподілу температури в площині мембрани перетворювача поверхневого типу в каналі висотою 300 мкм; а) - режим сталої потужності, $P_h = 1$ мВт; б) та в) – режим сталої температури ТГЕ.

В розділі проведено аналіз методів визначення теплофізичних параметрів досліджуваного середовища шляхом динамічного нагрівання ТГЕ за амплітудно-фазовими характеристиками зміни безпосередньо його температури або температури належним чином просторово розподілених ТЧЕ. Рівняння теплового балансу для змінної складової потужності $P_{2\omega}$ зондового тонкоплівкового плоского місткового ТГЕ запишемо у вигляді:

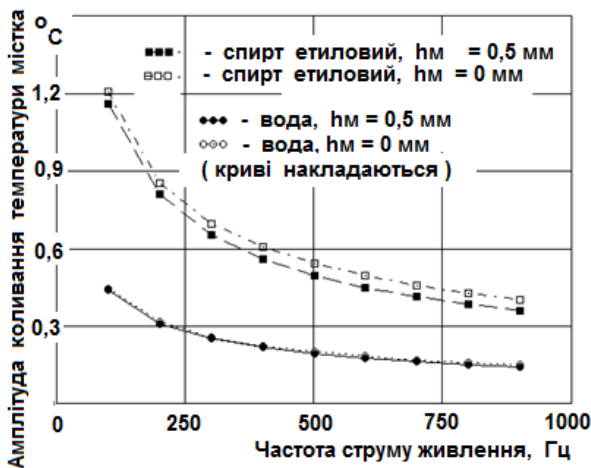
$$P_{2\omega} = i2\omega C_M \Delta T_{2\omega}(z=0) - 2k_C Lb \frac{\partial[\Delta T_C(z=0)]}{\partial z}, \quad (6)$$

де C_M – теплоємність зонду, k_C – теплопровідність середовища, $\frac{\partial[\Delta T_C(z=0)]}{\partial z}$ – градієнт амплітуди коливання температури середовища на межі з містком по нормалі до його поверхні. Розв'язок (6) дає залежність амплітуди коливання температури $\Delta T_{пл}$ та зсуву фази $\varphi_{пл}$ відносно фази коливання потужності від параметрів середовища:

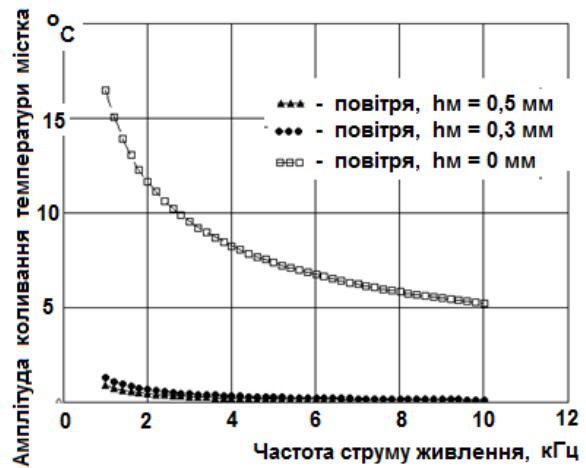
$$\Delta T_{пл}^a = \frac{P_{2\omega}/2S}{\sqrt{\omega} \sqrt{2k_C C_C \gamma_C + 2^2 \sqrt{k_C C_C \gamma_C} \sqrt{\omega} C_m \gamma_m h + \omega (C_m \gamma_m h)^2}}, \quad (7)$$

$$\text{tg } \varphi_{пл} = - \left(1 + \frac{\sqrt{\omega} \frac{C_M}{S}}{\sqrt{k_C C_C \gamma_C}} \right) = - \left(1 + \frac{C_M}{S} \sqrt{\frac{\omega}{k_C C_C \gamma_C}} \right), \quad (8)$$

де для випадку ТРПП прямокутної місткової геометрії $C_M = C_m \gamma_m Lbh$, де C_m та γ_m – питома теплоємність і густина матеріалу містка, L , b та h – відповідно довжина, ширина і товщина містка, $\gamma_m Lbh = m$ – маса містка, $2Lb = S$ – зовнішня поверхня теплообміну містка. Отримані відповідно до (7) розрахункові залежності зміни амплітуди коливання температури зондового ТГЕ у МЕМС виконанні наведено на рис. 6 для газів – повітря за нормальних кліматичних умов (н.к.у.) і CO_2 (рис. 6 а)), та рідин – води і етанолу (рис. 6 б)).



а)



б)

Рис. 6 Розрахункові частотні залежності амплітуди коливання температури плоского зонду розмірами 300 мкм x 800 мкм на діелектричній підкладці ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) товщиною h_m в наближенні плоскої хвилі. а) - зонд занурено в рідину, $P_{2\omega}=20$ мВт; б) - зонд в повітрі за н.к.у., $P_{2\omega}=5$ мВт.

Аналіз одержаних результатів дозволяє зробити наступні висновки:

- збудження плоскої теплової хвилі у водно-спиртових рідинних сумішах (довжина хвилі порядку 25 мкм – 30 мкм на частоті струму живлення 500 Гц) в частотному діапазоні 100 Гц – 1 кГц за амплітуди потужності 20 мВт дозволяє отримати амплітуду коливання температури до 1 °С для ТГЕ розмірами 300 мкм x 800 мкм (рис. 6 а));

- довжина плоскої теплової хвилі в газах (повітря, вуглекислий газ) на частоті теплового коливання 1 кГц становить 250 мкм – 300 мкм. Це робить проблематичним її збудження, оскільки геометричні розміри ТГЕ для вказаного частотного діапазону мають становити щонайменше декілька міліметрів.

При збудженні теплового коливання в газах вкрай критичною є власна теплоємність ТГЕ, що доводить залежність на рис. 6 б): товщини нікелю та діелектрику порядку 0,1 мкм більше ніж в 10 разів зменшують амплітуду коливання температури зондового ТГЕ. Значно менш критичним є вплив власної теплоємності та геометрії ТГЕ на збудження плоскої хвилі в рідинах, що показано на рис. 6 а). Розрахункова теплоємність нікелевого ТГЕ довжиною 800 мкм з товщиною та шириною меандру відповідно 0,1 мкм та 20 мкм, розміщеного на діелектричній підкладці SiO₂/Si₃N₄ з товщиною 0,4 мкм та шириною 300 мкм складає близько $4,5 \cdot 10^{-8}$ [Дж/°С].

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних робіт з вимірювання характеристик ТРПП активного нагрівання. Виконання контрольно-вимірювальних операцій в роботі покладено на автоматизовані стенди з використанням персонального комп'ютеру (ПК) для задавання робочих електричних режимів перетворювача, збору, обробки і аналізу отриманої інформації, управління вимірювальними процесами. В апаратній частині використано промислові плати збору даних із вбудованим USB інтерфейсом з ПК, до складу яких входять підсилювачі з програмно керованим коефіцієнтом перетворення, багатоканальні аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП). Програмним середовищем вибрано середовище графічного програмування LabVIEW (рис. 7).

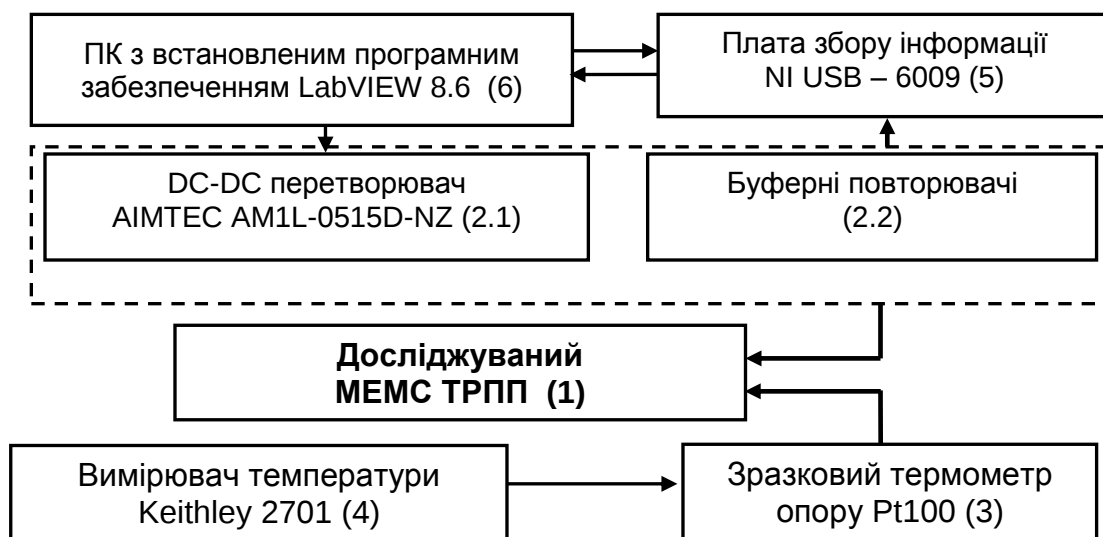


Рис. 7 Схематичне зображення автоматизованого стенду на основі NI USB 6009.

До складу стенду входять наступні функціональні вузли: 1 - досліджуваний зразок – МЕМС ТРПП; 2 - електрична схема управління первинним МЕМС-ТРПП з елементами живлення на DC-DC перетворювачі AIMTEC типу «AM1L-0515D-NZ» (2.1) та буферними повторювачами на основі операційних

підсилювачів (2.2); 3, 4 – контрольний вимірювач температури моделі Keithley Integra Series Data Acquisition System Model 2701 із зразковим термометром опору Pt-100; 5 - пристрій збору даних National Instruments NI USB-6009; 6 - ПК з встановленим програмним забезпеченням LabVIEW 8.6.

Шляхом програмних перетворень вимірних напруг з використанням вбудованих функцій Subtract, Multiply, Divide визначаються поточні значення активних опорів і температури ТГЕ та ТЧЕ, розсіюваної на кожному з них потужності. В непорушному повітрі за нормальних кліматичних умов визначено сталу розсіювання потужності мембранного ТРПП $G_{th} \approx 10^{-4}$ Вт/°С. Різниця температур між центральним ТГЕ та боковими ТЧЕ, розташованими на міжцентровій відстані 100 мкм, становить близько 100°С, що відповідає градієнту температур в площині мембрани 10^3 °С/мм. Теплова ефективність ТГЕ по відношенню до резисторів стороннього нагрівання становить величину близько 30%.

Отримані часові залежності зміни температури ТГЕ при зануренні ТРПП у дистильовану воду (рис. 8 а)) та у етиловий 96% спирт (рис. 8 б)) за умови їх живлення в імпульсному режимі. При зміні потужності ТГЕ від 2,5 мВт до 22,5 мВт відносно збільшення його електричного опору в спирті становить 32,6%, що відповідає зростанню температури на 68°С (рис. 8 а)) і сталій розсіювання близько 0,29 мВт/°С. При тій же зміні потужності збільшення опору ТГЕ у дистильованій воді склало 10,2%, що відповідає зростанню його температури на 22°С і сталій розсіювання близько 0,91 мВт/°С. Спостерігається також суттєва різниця в значенні теплової сталої часу ТРПП у вказаних речовинах також: 60 мс у спирті (рис. 8 а)) та 40 мс у дистильованій воді (рис. 8 б)).

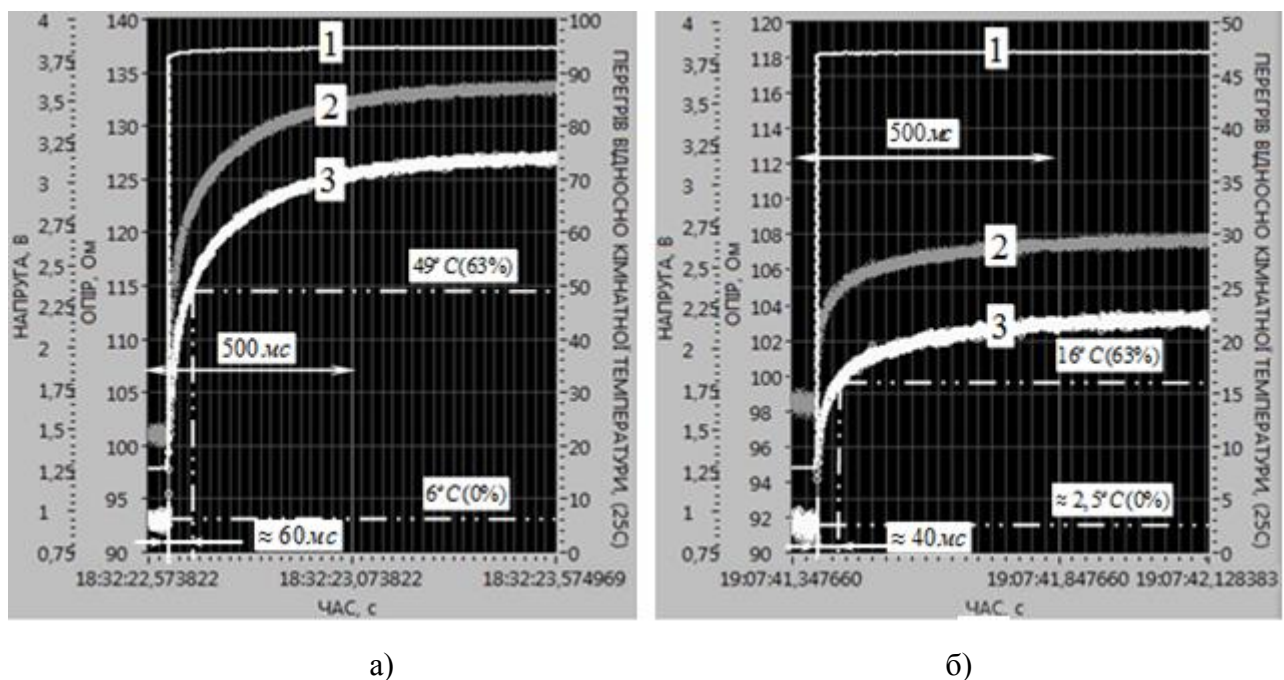


Рис. 8 Часові залежності зміни напруги (1), опору (2) та температури (3) активного ТГЕ: а) - у етиловому спирті (96%); б) – у дистильованій воді.

Розроблено схему вторинного перетворювача з компенсацією температурної залежності вихідного сигналу, реалізованою методом модуляції напруги живлення самозбалансованого містка. Для терморезисторів R_T , розміщеного на кремнієвій підкладці, та R_P , розміщеного на мембрані ТІС, отримуємо:

$$R_T = R_{T0}(1 + \alpha T_C); \dots \dots \dots R_P = R_{P0}(1 + \alpha(T_C + \Delta T_C)), \quad (9)$$

де α температурним коефіцієнтом опору, T_C - температура середовища, ΔT_C - температура розігрівання, що визначається із співвідношення:

$$\Delta T_C = R_{th} (U_1)^2 \frac{R_P}{(R_3 + R_P)^2}. \quad (10)$$

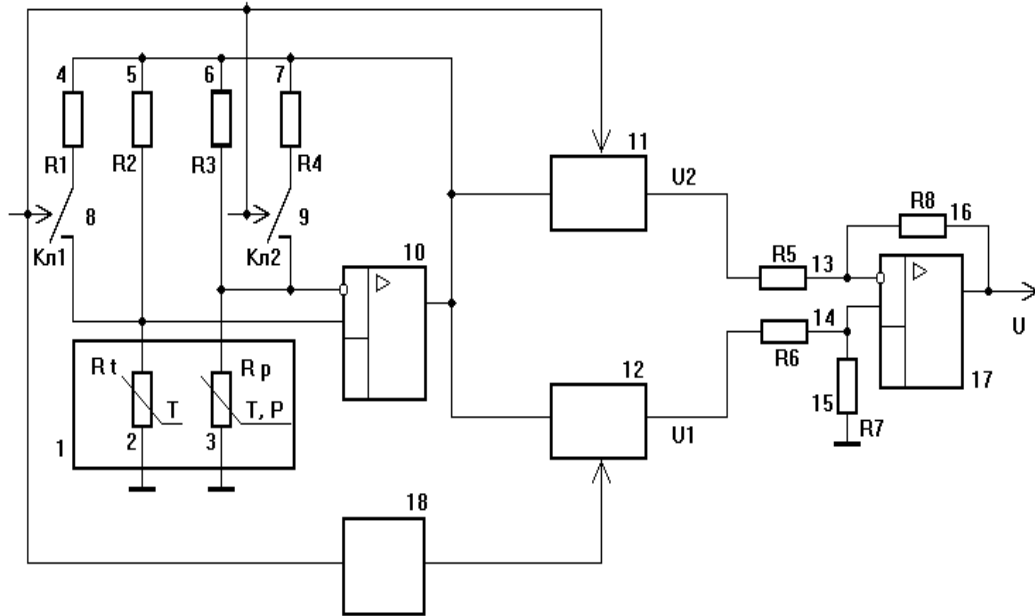


Рис. 9 Структурна схема терморезисторного перетворювача в схемі самозбалансованого містка із компенсацією нестабільності температури методом модуляції напруги живлення.

В схемі рис. 9 передбачена можливість періодичної зміни комбінації постійних резисторів мосту $R_1 - R_4$ шляхом комутації електронних ключів Кл1 и Кл2 під управлінням генератору 18. Схеми вибірки-зберігання (СВЗ) 11 і 12 забезпечують запам'ятовування напруги з виходу операційного підсилювача 10 у відповідних напівперіодах вимірювання. Коли ключі розімкнуті, напруга U_1 на виході операційного підсилювача 10 набуває значення, що забезпечує баланс опорів у мості завдяки саморозігріванню резистору R_P . За умови збалансованості мосту за рахунок зворотного зв'язку $\frac{R_3}{R_P} = \frac{R_2}{R_T}$, отримано залежності для розімкнених (11) та замкнених (12) станів ключів:

$$U_1 = \left\{ R_{th}^{-1} \frac{R_3}{\alpha R_{T0} R_2} \left[\frac{R_3 R_{T0}}{R_2 R_{P0}} - 1 \right] \right\}^{1/2} [R_2 + R_{T0}(1 + \alpha T_C)]; \quad (11)$$

$$U_2 = \left\{ R_{th}^{-1} \frac{R_3''}{\alpha R_{T0} R_2''} \left[\frac{R_3'' R_{T0}}{R_2'' R_{P0}} - 1 \right] \right\}^{1/2} [R_2'' + R_{T0}(1 + \alpha T_C)], \quad (12)$$

де $R3'' = \frac{R3 \cdot R4}{R3 + R4}$, а $R2'' = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}$.

Напруги $U1$ та $U2$ запам'ятовуються схемами вибірки-зберігання СВ31 та СВ32, синхронізацію котрих із ключами виконано таким чином, що період вибірки схеми 11 відповідає замкнутому стану ключів, а період вибірки схеми 12 - розімкнутому. Виконавши додаткову умову $\frac{R3}{R2} = \frac{R3''}{R2''}$, отримуємо:

$$U = U1 - U2 = \left\{ R_{th}^{-1} \frac{R3}{\alpha R_{T0} R2} \left[\frac{R3 R_{T0}}{R2 R_{P0}} - 1 \right] \right\}^{1/2} [R2 - R2''] \quad (13)$$

Зміни температури середовища призводять до зміни номіналів резисторів R_P та R_T та до наступної зміни температури розігрівання ΔT_C резистора R_P , однак вихідна напруга запропонованої схеми у відповідності до (13) не залежить від вказаних механізмів температурної похибки.

Випробування ТРПП вакууму типу Пірані виконано на промисловій вакуумній установці УВН-2М, оснащений вакуумметром ВІТ-2П з іонізаційним ПМН-2 та термопарним ПМТ-2 перетворювачами, а також на редукційній вакуумметричній установці ОРУ-2М, атестованій як зразковий засіб вимірювання тиску другого класу. Результати наведені на рис. 10 а); для порівняння наведено характеристику перетворення промислового аналога ПМТ-6-3. Розроблені ТРПП в режимі живлення за сталою температурою ТГЕ мають чутливість до абсолютного тиску повітря в діапазоні від 0,04 Па до 10 кПа, споживана потужність 3 мВт, температура ТГЕ - до 100 °С.

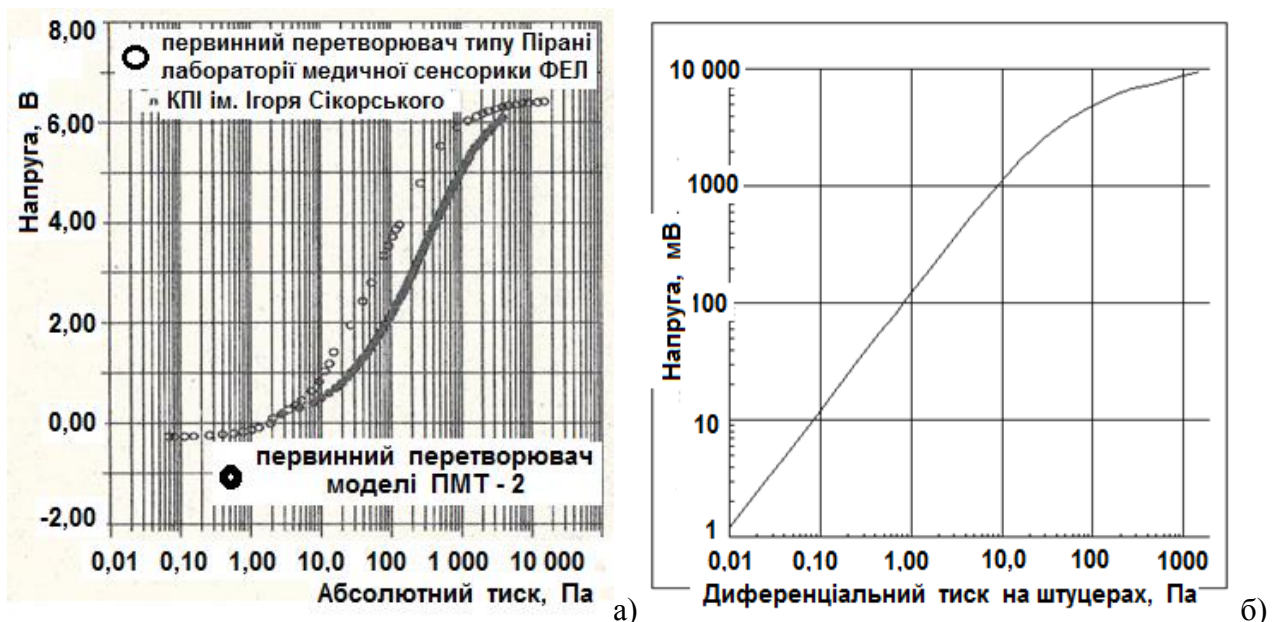


Рис. 10 Характеристика перетворення а) – перетворювач вакууму типу Пірані в режимі сталої температури ТГЕ, б) – перетворювач диференціального тиску для спірометру „ПУЛЬМОВЕНТ”, ТУ У 19018095.001-96.

Експериментальні дослідження розроблених ТРПП у складі “Комплексу автоматизованого для дослідження функції зовнішнього дихання ПУЛЬМОВЕНТ 1 і ПУЛЬМОВЕНТ 1.002”, ТУ У 19018095.001-96 виконано з використанням

ротаметричної установки 1-го класу з межами відтворюваних об'ємних витрат повітря від 0,02 до 16,36 л/с.

На рис. 11 наведено блок – схему каналу вимірювання об'ємних витрат повітря та результати тестування вимірювального каналу з використанням зразкового калібрувального шприца об'ємом $V_0 = 1$ л з комплексу приладу з похибкою відтворення об'єму $\pm 1\%$. Доведено можливість використання розроблених ТРПП в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини з виконанням комплексу сучасних медико-технічних вимог.

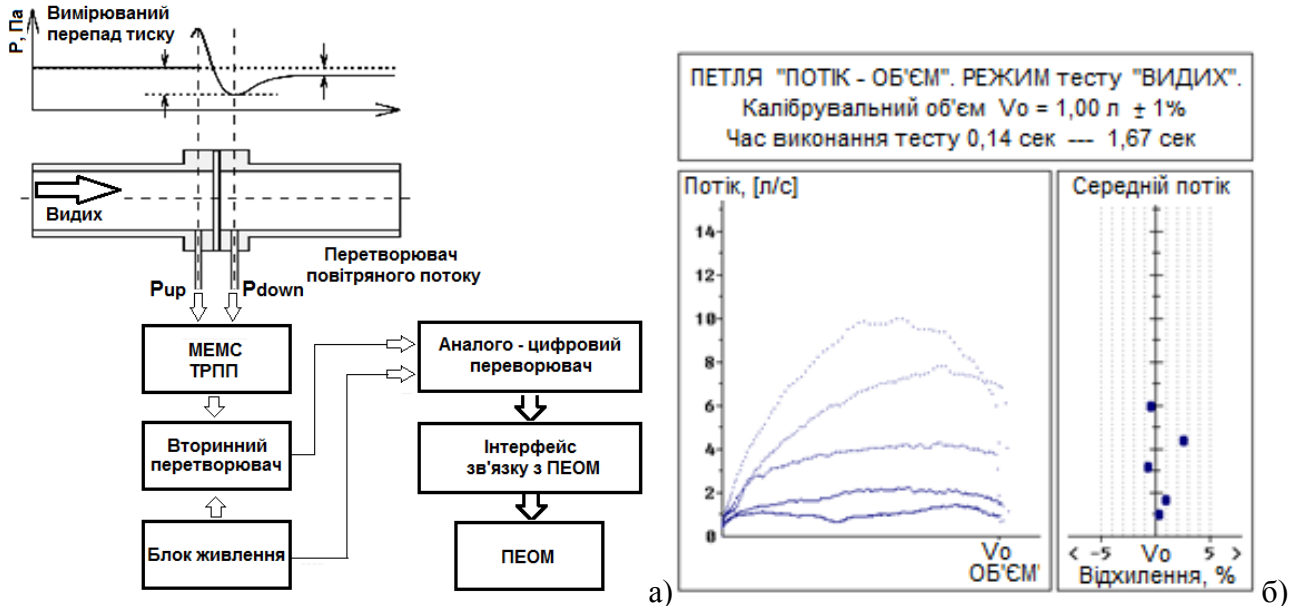


Рис. 11 Блок-схема каналу вимірювання об'ємних витрат повітря в автоматизованому комплексі для діагностики функції зовнішнього дихання людини (а)); результати тестування вимірювального каналу калібрувальним шприцом об'ємом $V_0 = 1 \text{ л} \pm 1\%$ (б)).

Характеристику перетворення триелементного ТРПП адаптовано до діапазону диференціального тиску на вихідних штуцерах в складі вимірювального каналу об'ємних витрат повітря через перетворювач повітряного потоку. Як видно з рис. 10 б), діапазон чутливості до зміни вхідного диференціального тиску на вхідних штуцерах ТРПП – близько п'яти порядків від 0,02 до 1000 Па.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень на основі встановлених закономірностей впливу фізико-топологічних характеристик на метрологічні параметри розв'язано науково-прикладну задачу розробки терморезисторних первинних перетворювачів із конструктивно керованими характеристиками перетворення. В роботі отримано наступні результати:

1. Розроблено нові ТРПП у МЕМС виконанні з удосконаленою конструкцією ТІС, що дозволяє розширити діапазони чутливості ТРПП та реалізувати нові методи вимірювань параметрів середовища. За результатами досліджень функції перетворення активних твердотільних ТРПП теплофізичних параметрів середовища за методиками динамічного нагрівання запропоновано способи вимірювання абсолютного тиску та густини газу, що використовують специфіку в конструктивно-топологічних аспектах ПП, виготовлених за технологією МЕМС. Запропоновані технічні рішення на способи виготовлення

таких ТРПП у MEMC виконанні захищено двома патентами, а на способи вимірювання та пристрої, що їх реалізують – трьома патентами.

2. Доведено функціональні і конструктивно-топологічні переваги активних багатоелементних ТРПП над одноелементними аналогами на прикладі калориметричного ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) рідини та газу. Триелементний калориметричний перетворювач швидкості рідини або газу в каналі має регульовану за діапазоном лінійності характеристику перетворення в нижній частині діапазону, а діапазон її монотонної залежності визначається взаємним розташуванням ТЧЕ і ТГЕ та висотою каналу, тобто є конструктивно керованим. Чутливість триелементного місткового занурюваного перетворювача шириною 40 мкм в каналі висотою 300 мкм в 2,5 рази вища за чутливість одноелементного аналога за лінійної швидкості повітря в каналі 0,1 м/с.

3. Встановлено, що збільшення висоти каналу калориметричного ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) рідини або газу в режимі сталої потужності ТГЕ призводить до істотного підвищення чутливості до швидкості потоку середовища в каналі з одночасним звуженням діапазону лінійності. Для нагрівача шириною b в діапазоні 10 – 100 мкм висота каналу D в 200 – 300 мкм є перехідною від зони “сильної” залежності температури нагрівача від висоти каналу до зони “слабкої”. Сильна залежність ($D < 100$ мкм) характерна для сумірних значень висоти каналу і ширини нагрівача; вона описується обернено пропорційною залежністю коефіцієнту теплообміну від відстані до теплового стоку, яка накладається на аналогічну залежність від ширини нагрівача. Отриманий результат дає змогу сформулювати інженерну методику проектування ТРПП у MEMC виконанні на потрібний вимірювальний діапазон.

4. У результаті проведеного комплексного аналізу теплообмінних процесів в ТРПП та електричних процесів в колах вторинного перетворювача за схемою самозбалансованого мосту виявлено закономірності впливу зміни температури вимірюваного середовища на характеристику перетворення, що дало змогу розробити новий спосіб компенсації температурної чутливості ТРПП за методом модуляції струму живлення ТГЕ (захищено патентом).

5. Проведено апробацію ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) газу в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини “Комплекс автоматизований для дослідження функції зовнішнього дихання ПУЛЬМОВЕНТ 1 і ПУЛЬМОВЕНТ 1.002”, ТУ У 19018095.001-96 та доведено можливість їх використання з повним виконанням комплексу сучасних медико-технічних вимог до названих приладів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лупина Б.І. Мікромеханічний поверхневий терморезисторний перетворювач лінійної швидкості середовища в каналі прямокутного перерізу - Електроніка та зв'язок, 2016, Том 21, №3 (92). С. 17 – 28. (Індексується в Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
2. Борисов А.В. Исследование динамических характеристик микро-механических терморезисторных преобразователей физических параметров жидкости и газа на аппаратной платформе NI Elvis II в программной среде LabVIEW / А.В. Борисов, И.С. Дейнека, Б.И. Лупина // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. Том 9, №4. С. 562 – 568.
3. Лупина Б.І. Аналітичний розрахунок параметрів мікромеханічного терморезисторного перетворювача / Б.І. Лупина, О.В. Борисов// -Електроника и связь, 2004, № 21, Т. 9. С. 10–13.

4. Лопата В.А. Мониторинг и диагностика функции дыхания в условиях применения телемедицинских технологий / В.А. Лопата, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Ю.С. Синекон // - Электроника и связь, 2001, № 11. С. 78 – 80.
5. Лопата В.А. Оценка преобразователей объемного расхода воздушного потока как объекта стандартизации флоуспирометров / Лопата В.А., Островский О.И., Кацан И.И., Лупина Б.И., Синекон Ю.С., Эльози Х. // - Электроника и связь, 1999, N 6, т.2. С. 252 – 255.
6. Грудин О.М. Микроэлектронный датчик для измерения малых перепадов давления /О.М. Грудин, П.Д. Иванов, И.И. Кацан, С.Н. Кривоблоцкий, Б.И. Лупина, В.И. Почтарь// Приборы и техника эксперимента, 1995, № 2. С.193-197.
7. Грудин О.М. Микроэлектронный терморезистивный датчик скорости изменения давления газа / О.М. Грудин, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Г.А. Фролов // Приборы и техника эксперимента, 1995, № 4. С. 161 – 166.
8. Грудин О.М. Терморезистивный датчик вакуума / О.М. Грудин, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, В.И. Почтарь, Г.А. Фролов //«Вакуумная техника и технология», 1994, т. 4, № 2. с. 5–7.
9. Кацан И.И. Тонкопленочный никелевый болометр / И.И. Кацан, Б.И. Лупина, В.И. Почтарь, Г.А. Фролов // Приборы и техника эксперимента, 1994, № 4. С. 199 – 202.
10. Головнюова І.В. Спосіб вимірювання тиску газів і пристрій для його реалізації / І.В. Головнюова, О.М. Грудін, В.Ф. Заворотний, П.Д. Иванов, І.І. Кацан, Б.І. Лупина, В.І. Почтар, Г.О. Фролов // Патент України на винахід №19035 від 25.12.1997 р.
11. Головнева И.В. Способ изготовления терморезистивного преобразователя» / И.В. Головнева, О.М. Грудин, В.Ф. Заворотный, П.Д. Иванов, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Г.А. Фролов, В.И. Почтарь // Пат. РФ на изобретение №2085874. Подача заявки: 24.09.1992 г., публикация: 27.07.1997 г.
12. Головнева И.В. Способ измерения давления газов и устройство для его осуществления / И.В. Головнева, О.М. Грудин, В.Ф. Заворотный, П.Д. Иванов, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, В.И. Почтарь, Г.А. Фролов // Пат. РФ на изобретение №2036448 от 04 февраля 1991 г. (дата подачи), дата публикации 27.05.1995 г.
13. Лупина Б.И. Теплоэлектрический вакуумметр // Патент РФ на изобретение №2104507 от 5 октября 1995 г. Дата публикации 10.02.1998 г.,
14. Козирський В.В. Спосіб виготовлення матриці терморезисторних перетворювачів / В.В. Козирський, В.М. Решетюк, С.М. Осінов, А.Т. Орлов, Б.І. Лупина, І.С. Дейнека // Патент на корисну модель UA 76885 U. Номер заявки: u 2012 05498. Публікація відомостей: 25.01.2013, Бюл. №2.
15. Заворотний В.Ф. Спосіб визначення густини газів / В.Ф. Заворотний, О.В. Борисов, Б.І. Лупина, С.М. Осінов // Патент на корисну модель №18749 від 15 лист. 2006 р. Бюл. № 11.
16. Борисов О.В. Багатофункціональний терморезисторний перетворювач механічних та теплофізичних параметрів середовища / О.В. Борисов, Б.І. Лупина, Г.Л. Сорохтіна // 5-й Міжнародний радіоелектронний форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития”. Харьков, Украина, 14-17 октября 2014 г. Том III, стр. III-96 – III-99.
17. Борисов О.В. Вимірювання динамічних параметрів мікромеханічного терморезисторного перетворювача з використанням програмно-апаратного комплексу NI Elvis II / О.В. Борисов, І.С. Дейнека, Б.І. Лупина // Электроника и связь. –2011. №5 (64). –с.5-12. XXXI Міжнародна науково-технічна конференція ”Електроніка та нанотехнології”, м.Київ, Україна, 12-14 квітня 2011 р.

18. Борисов О.В. Автоматизированный стенд на основе платы сбора данных NI USB-6009 для измерения статических параметров микромеханического терморезисторного перетворювача / О.В. Борисов, І.С. Дейнека, Б.І. Луцина // *Электроника и связь*. – 2010. – №5. – с. 113-119. XXX Міжн. н.-т. конф. "Електроніка та нанотехнології", м. Київ, Україна, 13-15.04.2010.
19. Борисов О.В. Микромеханический терморезисторный перетворювач швидкості газу / О.В. Борисов, Б.І. Луцина, Г.Л. Сорохтіна // 3-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". Харьков, Украина, 22 - 24 октября 2008 г.
20. Борисов О.В. Моделирование микромеханического терморезисторного перетворювача параметров газового срединища / О.В. Борисов, В.Ф. Заворотний, Б.І. Луцина, С.М. Осінов, Г.Л. Сорохтіна // II-я Международная научно-техн. конференция «ДАТЧИКИ, ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ – 2007», 13-22 сентября, г. Ялта. Вісник Черкаського держ. техн. універс., 2007 Спецвыпуск. С. 60 – 62.
21. Борисов О.В. Спосіб вимірювання густини газів за фазовими характеристиками теплової хвилі / О.В. Борисов, В.Ф. Заворотний, Б.І. Луцина, С.М. Осінов, Г.Л. Сорохтіна // II-я Международная научно-техн. конф. «ДАТЧИКИ, ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ – 2007», 13-22 сентября, г. Ялта. Вісник Черкаського держ. техн. Універс., 2007 Спецвыпуск. с. 161–163.
22. Луцина Б.І. Моделирование та оптимізація конструкції микромеханического терморезисторного перетворювача / Б.І.Луцина, О.В.Борисов, В.Ф.Заворотний, І.І.Кацан, С.М.Осінов // 2-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". Харьков, Украина, 19-23 сентября 2005 г. Том 3, стр. 240 - 243.
23. Лопата В.А. Применение микроэлектронной техники в составе флоуспирометрической аппаратуры / В.А. Лопата, И.И. Кацан, Б.И. Луцина, Ю.С. Синекон, Х. Эльози // Сборник научных трудов по материалам 5-й Международной конференции "Теория и техника передачи, приема и обработки информации", Харьков, 1999, с.280-282.
24. Лопата В.А. Вопросы применения электронных датчиков в составе флоуспирометрической аппаратуры / В.А. Лопата, Кацан И.И., Луцина Б.И., Фролов Г.А., Эльози Х. // - *Электроника и связь*, 1998, 4, ч. III. Проблемы физической и биомедицинской электроники: выпуск по материалам Международной научно-технической конференции. Киев, 28-30 Мая 1998 г., с. 615-619.
25. Грудин О.М. Возможности электронных преобразователей давления в решении метрологических проблем флоуспирометрии / Грудин О.М., Кацан И.И., В.А.Лопата, Луцина Б.И., Эльози Х., Фролов Г.А. // Международная конференция по биомедицинскому приборостроению „Биомедприбор-98”, Москва, НИИ мед. приборостроения РАМН, 6-8 октября 1998 г., с. 33-35.
26. Grudin O.M. Thermal microsensor with a.c. heating for gas-pressure measurements / O.M. Grudin, G.A. Frolov, I.I.Katsan, B.I. Lupina // *Sensors and Actuators A: Physical*. Volume 62, Issues 1–3 (July 1997), p.p. 571-575. Proc. of Eurosensors X, Leuven, Belgium, 8–11 Sept. 1996.
27. Frolov G.A. Micromechanical thermal sensors for gas parameters measurements / G.A. Frolov, A.V. Gendin, O.M. Grudin, I.I. Katsan , S.N. Krivoblotsky B.I. Lupina // The 1996 ASME International Mechanical Engineering congress and exposition, November 17-22, 1996, Atlanta, Georgia, USA. Micro-Electro-Mechanical Systems, DSC-Vol.59, p.p. 61-65.

28. Frolov G.A. Micromechanical gas heat capacity sensor / G.A. Frolov, O.M. Grudin, I.I. Katsan, B.I. Lupina / ESSDERC '96, 26th European Solid State Device Research Conference. Technical digest, p.p. 215 – 218.

Анотація

Лупина Б.І. Мікромеханічні терморезисторні перетворювачі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розробці терморезисторних первинних перетворювачів (ТРПП) за технологією мікроелектромеханічних систем на кремнії та встановленню фізико-технічних і конструктивних закономірностей зв'язку їх електричних і температурних характеристик із параметрами оточуючого середовища. Виконано моделювання місткових і мембранних термоізолюваних структур в каналі прямокутного перетину на основі спільного розв'язку рівнянь теплопровідності для місткового перетворювача і середовища в каналі. Встановлено аналітичну залежність теплового опору термоізолюваної структури від теплопровідності середовища, форми і геометричних розмірів теплогенеруючого елементу і каналу. Доведено функціональні і конструктивно-топологічні переваги багатoelementних ТРПП над одноelementними аналогами на прикладі калориметричного ТРПП лінійної швидкості рідини та газу.

Аналітично встановлено, що діапазон монотонної лінійної залежності вихідної характеристики триelementного калориметричного ТРПП є конструктивно керованим, а чутливість занурювального перетворювача шириною 40 мкм в каналі висотою 300 мкм в 2,5 рази вища за чутливість одноelementного аналога за величини лінійної швидкості повітря в каналі 0,1 м/с.

Виявлено закономірності впливу зміни температури вимірюваного середовища на характеристику перетворення теплогенеруючого елементу в самозбалансованих місткових схемах, розроблено новий спосіб компенсації температурної чутливості за методом модуляції струму живлення. Розроблено способи виготовлення первинних перетворювачів, способи вимірювання абсолютного тиску та густини газів за методикою динамічного нагрівання. Проведено апробацію перетворювачів лінійної швидкості (об'ємних витрат) газу в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини з виконанням комплексу медико-технічних вимог до сучасних спірометрів.

Ключові слова: терморезисторний первинний перетворювач, мікроелектромеханічна система, тепловий опір, калориметричний метод.

Аннотация

Лупина Б.И. Микромеханические терморезисторные преобразователи. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2017.

Диссертационная работа посвящена разработке терморезисторных первичных преобразователей (ТРПП) по технологии микроэлектромеханических систем на кремнии и выяснению физико-технических и конструктивных закономерностей связи их электрических характеристик с параметрами окружающей среды. Предложена

методика расчета тепловых полей в теплоизолированных структурах, основанная на решении уравнений теплопроводности в двумерном приближении. Получены аналитические выражения для параметра рассеяния мощности мостиковых и мембранных теплоизолированных структур в потокоформирующем канале прямоугольного сечения. Доказаны функциональные преимущества активных многоэлементных ТРПП над одноэлементными аналогами на примере калориметрического поверхностного ТРПП линейной скорости газа. Аналитически доказано, что диапазон монотонной зависимости выходной характеристики трехэлементного калориметрического ТРПП линейной скорости флюида задается конструктивно соотношением высоты потокоформирующего канала и расстоянием между нагревателем и измерителем температуры. Установлено, что чувствительность погружного мостикового калориметрического преобразователя с шириной активного нагревателя 40 мкм в канале высотой 300 мкм в 2,5 раза выше чувствительности одноэлементного термоанемометрического аналога при скорости воздуха в канале 0,1 м/с.

Разработаны и запатентованы способы изготовления первичных преобразователей, способы измерения абсолютного давления и плотности газов по методике динамического нагрева, способ компенсации влияния неустойчивости температуры среды на характеристику преобразования в самобалансирующихся схемах. Разработанные ТРПП использованы в медицинском приборе для диагностики функции внешнего дыхания человека.

Ключевые слова: терморезисторный первичный преобразователь, микро-электромеханическая система, тепловое сопротивление, калориметрический метод.

Summary

Lupyna B.I. Micromechanical thermal resistive transducers. - Manuscript.

PhD thesis on speciality 05.27.01 – solid-state electronics. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2017.

This thesis is devoted to investigation of micrometer size bridge and membrane thermal resistive transducers manufactured by the technology of micro-electro-mechanical systems (MEMS). The thermal fields design procedures into the planar bridge and membrane resistors, based on the joint solution of the heat conductivity equation in two-dimensional approach, were offered. Mathematical models and algorithms which allow up to simulate distributions of temperature along bridge and membrane structure and into the microfluidics flow channel are designed. Intrinsic correlations between a fluid properties, transducer's thermal and electrical behavior under a basis of a self-heating effect were specified. The dependence of a heater thermal resistance on its shape and a channel geometry, the operation modes, the thickness of dielectric layers and membrane area were investigated. Influence of self-heating effect on the output voltage characteristics is established for non-intrusive fluid velocity transducer mounted at a flow channel wall with rectangular cross-section. The dependence of the self-balanced bridge feedback voltage from an ambient fluid temperature were defined analytically; the recommendations for choosing the self-heating technique compensation method based on switching resistors were proposed. The transducers were used into a lung diagnostics medical device.

Key words: MEMS thermal transducer, self-heating, thermal feedback, calorimetric sensor.

Підписано до друку 07.03.2017 р.

Формат 60х90/16. Папір офсетний. Друк різнографічний.

Кількість умовних друкованих аркушів 0,9

Тираж 100 екз. Замовлення №170301.

Суб'єкт видавничої діяльності занесено до державного реєстру №620049 13.10.2008,

ПРІНТЦЕНТР, м.Київ, вул. Політехнічна, 16