

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,
професора кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вербицького Володимира Григоровича

на дисертаційну роботу **Бойко Оксани Василівни**

**“Функціонально-інтегровані сенсори термічного аналізу на структурах
твердотільної електроніки”**,

поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка

Подальший прогрес в задачах фізичних, біофізичних та електрохімічних досліджень можливий завдяки вдосконаленню мікроелектронних сенсорів термічного аналізу, зокрема на основі компонентів твердотільної електроніки. В основі таких мікроелектронних сенсорів лежать методи вимірювання властивостей речовини в залежності від температури та затраченої чи виділеної теплової енергії в ході екзо- та ендотермічних хімічних реакцій. Їх розвиток забезпечить проведення оперативних вимірювань фізичних властивостей матеріалів з високою точністю та достатньою оперативністю як на виробництві, так і під час проведення наукових досліджень.

Особливої актуальності мікроелектронні сенсори термічного аналізу набувають при проведенні біомедичних досліджень. Розробка біоматеріалів, вивчення лікарських препаратів і регулювання взаємодії білків потребує виявлення найнезначніших змін температури в зразках малого обсягу. Відповідно виникає потреба у вдосконаленні сенсорів термічного аналізу. При цьому основними напрямками їх розвитку є мініатюризація та конструктивно-технологічна сумісність з базисом сучасних твердотільних (кремнієвих) інтегральних схем, а також функціональне інтегрування, що передбачає поєднання декількох методів дослідження в єдиний комплекс.

Дисертаційна робота Бойко Оксани Василівни присвячена новій тенденції розвитку сучасної сенсоріки – функціональному інтегруванню різноманітних взаємодоповнюючих мікроелектронних сенсорів в єдину систему на основі засад твердотільної електроніки. Такі сенсорні системи базуються на концепціях синтезу даних (Data Fusion), злиття сенсорів (Sensor Fusion) та «Лабораторія на Чипі» (Lab on Chip). Відтак, актуальність роботи обумовлюється вирішенням науково-прикладної проблеми розроблення та оптимізації режимів роботи функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу.

Функціональне інтегрування реалізується шляхом використання однієї і тієї ж мікроелектронної структури для керованого нагріву досліджуваного зразка у відповідності до заданого алгоритму модуляції теплового потоку; вимірювання температури досліджуваного зразка чи різниці температур між досліджуваним та опорним зразками; вимірювання зміни характеристик досліджуваного зразка під дією зовнішнього впливу, зокрема, електричних, магнітних чи оптичних властивостей досліджуваного зразка в процесі модуляції зовнішнього впливу та температури.

Дисертаційна робота вирішує науково-прикладну проблему, що відповідає науковим напрямкам кафедри електронних приладів Національного університету «Львівська політехніка»: «Сучасні елементи, пристрої напівпровідникової електроніки

високого ступеня інтеграції»; «Біомедична електроніка». Робота виконувалась в межах науково-дослідних робіт: «Радіоелектронні пристрої з елементами індустріального інтернету речей для систем магнітної діагностики реакторів термоядерного синтезу» № держреєстрації 0118U000265, «Вплив зовнішніх факторів на спектральні властивості композитів із спіральною структурою для первинних перетворювачів сенсорів біологічних речовин» (№ держреєстрації 0117U003809), «Створення моделей, елементної та алгоритмічної бази для медичних інформаційних систем (МІС)» (№ держреєстрації 0114U000107), «Створення моделей медико-біологічних даних» (№ держреєстрації 0108U001138).

Структура та зміст дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи, об'єкт і предмет дослідження, основні завдання, проведені теоретичні й експериментальні дослідження та отримані результати.

На основі проведеного аналізу основних напрямків, переваг і досвіду застосування термоаналітичних, зокрема калориметричних методів дослідження, сучасних пристроїв термічного аналізу і тенденцій їх розвитку автор обґрунтував подальший розвиток сенсорів термічного аналізу на основі сучасних мікроелектронних елементів, їх системотехніки, мікросхемотехніки сигнальних перетворювачів, математичного, модельного та програмного забезпечення.

Розроблено методи вдосконалення сигнальних перетворювачів терморезистивних та термоелектричних сенсорів, що використовуються при термічному аналізі для забезпечення керованого нагріву та вимірювання температури. Розроблено нові структури двошарових плівкових терморезистивних мостових схем, які забезпечили вимірювання абсолютної та різницевої температури з роздільною здатністю $2,5 \cdot 10^{-3}$ °С в діапазоні $-10 - 100$ °С. Запропоновано метод компенсації квадратичної складової залежності опору від температури на основі пропускання через терморезистор компенсаційного струму, значення якого лінійно залежить від значення вимірюваної температури. Використання методу комутаційного інвертування дозволило компенсувати вплив опорів ліній зв'язку терморезистивних сенсорів в діапазоні $0 - 30$ Ом. Для підвищення швидкодії запропоновано проводити вимірювання опору терморезистора у визначений момент часу перехідного процесу з наступним обчисленням значення вимірюваної температури. Також запропоновано методи компенсації температури вільних кінців термоелектричних перетворювачів.

Запропоновано принципи побудови функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на основі компонентів твердотільної мікроелектроніки, зокрема транзисторних структур, та багатофункціональних сигнальних перетворювачів, що передбачає використання однієї і тієї ж мікроелектронної структури для керованого нагріву досліджуваного зразку чи середовища у відповідності до заданого алгоритму модуляції теплового потоку; вимірювання температури досліджуваного зразка чи різниці температур між досліджуваним та опорним зразками; вимірювання зміни оптичних, магнітних, механічних чи імпедансних характеристик досліджуваного зразка в процесі модуляції його температури.

Проведено параметричний аналіз кіл керування двофункціональних транзисторних перетворювачів, в яких забезпечується незалежне керування напругою та струмом кола транзистора за допомогою джерел струму та кіл зворотного зв'язку.

Розроблено комплексну методику математичного SPICE моделювання та дослідження структур сенсорів термічного аналізу. Запропоновано подальший розвиток методів електротеплової аналогії для синтезу схем заміщення SPICE моделей сенсорів термічного аналізу. Основними інформативними величинами таких сенсорів є температура фазового переходу (зокрема, плавлення, склування, кристалізації тощо) досліджуваної речовини та кількість теплової енергії, яка поглинається чи виділяється в процесі такого переходу.

Запропоновано підходи щодо універсалізації електротеплових SPICE моделей сенсорів термічного аналізу на основі розробленого функціонального SPICE компоненту, який умовно названо Thermicap (термікап). Електрична схема заміщення цього компоненту, базуючись на термічно керованому колі з комутацією конденсатора, дозволяє проводити комплексне структурно-схемотехнічне моделювання електронних пристроїв дослідження ендотермічних та екзотермічних процесів фазового переходу речовин з акумуляцією теплової енергії.

У роботі проведено дослідження та оптимізацію режимів роботи сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах. Вперше запропоновано критерії оцінки точності функціонування сенсора різницевої температури на диференційних каскадах, що забезпечують мінімальні значення похибок лінійної апроксимації.

Теоретичні дослідження на основі розрахунку точності вимірювального перетворення за критерієм абсолютних похибок лінійної апроксимації $Error(dt)_i [^{\circ}C]$ показали, що при номінальній температурі (умовно прийнято $t_{NOM} = 50^{\circ}C$) похибка лінійної апроксимації не перевищує значення $0,025^{\circ}C$ і практично не залежить від опорної напруги. Натомість при відхиленні значення абсолютної температури від номінального похибка лінійної апроксимації зростає і має виражену залежність від опорної напруги. Так, при граничних значеннях абсолютної температури ($t_{MIN} = 0^{\circ}C$ та $t_{MAX} = 100^{\circ}C$) максимальне значення модуля похибки лінійної апроксимації при $U_{REF} = 1,0$ В збільшується до $0,3^{\circ}C$. Значення опорної напруги U_{REF} , при якому похибка апроксимації практично не залежить від абсолютної температури, знаходиться в діапазоні від 1,2 В до 1,3 В.

Досліджено можливості реалізації оптичного сенсора температури на основі органічних структур. Проведено моделювання теплових процесів та оптичних властивостей полімердиспергованих рідких кристалів (ПДРК), на основі чого було показано доцільність реалізації оптичного сенсора температури на основі ПДРК вбудованого в оптоволокно. При цьому було реалізовано можливість вимірювання температури в декількох точках, рознесених між собою в просторі, з використанням одного оптоволоконного тракту та детектора. Наведено результати модельних та експериментальних досліджень властивостей органічних термочутливих світловипромінювальних та фоточутливих структур, які дали змогу запропонувати принципово нові підходи для створення функціонально-інтегрованих оптичних сенсорів температури. Це дозволило об'єднати в одній структурі джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання.

Автор наводить приклади апаратно-програмної реалізації мікроелектронних сенсорів термічного аналізу, зокрема, сигнального перетворювача функціонально-інтегрованих термомагнітних сенсорів, сенсора різницевої температури з функцією інтегрування та сигнального перетворювача сенсора термічного аналізу на

основі поєднання термічних та ємнісних методів досліджень, що підвищує достовірність термоаналітичних досліджень. Пристрої характеризуються високими значеннями роздільної здатності вимірювання температури (менше $0,001^{\circ}\text{C}$) та відповідають критеріям та вимогам мікроелектронних пристроїв Інтернету речей: однополярне низьковольтне живлення (3–5 В), мінімальне енергоспоживання (10^{-5} – 10^{-2} Вт), функціонування в широкому діапазоні вхідних та вихідних напруг (rail-to-rail режими роботи), універсальність та стабільність функціонування при зміні зовнішніх впливів.

У дисертації Бойко О.В. логічно і послідовно наведені результати досліджень, моделювань, розробок які складають основу структурно-параметричної модифікації сенсорів термічного аналізу, за результатами якої розроблено експериментальні зразки мікроелектронних сенсорних пристроїв.

Отримані результати підтверджують високу ефективність використання розроблених у дисертаційній роботі функціонально-інтегрованих сенсорів та відповідність їх реальних параметрів результатам досліджень, отриманих на основі SPICE моделювання.

Найвагомішими та достовірними результатами, які характеризують наукову новизну роботи та особистий внесок автора можна вважати:

1. Запропоновано концепцію функціонального інтегрування мікроелектронних сенсорів термічного аналізу на основі компонентів та схемотехнічних вузлів твердотільної електроніки, новизною якої є можливість використання однієї і тієї ж мікроелектронної структури для керованого нагріву досліджуваного зразка чи середовища у відповідності до заданого алгоритму модуляції теплового потоку; вимірювання температури досліджуваного зразка чи різниці температур між досліджуваним та опорним зразками; вимірювання зміни оптичних, магнітних, механічних чи імпедансних характеристик досліджуваного зразка в процесі модуляції його температури.
2. Отримала подальший розвиток концепція електротеплової аналогії, яка полягає в заміщенні теплових характеристик на їх електричні аналоги: різниця температур $\Delta T(t)$ заміщається різницею напруг $\Delta V(t)$, тепловий потік Φ_T чи потужність P_T заміщається електричним струмом I_T , а тепловий опір R_{θ} та теплоємність C_{θ} – еквівалентними їм електричним опором R_T та ємністю C_T конденсатора. Теплові перехідні процеси описуються еквівалентними схемами Фостера та Кауера у виді декількох RC ланок. На їх основі розроблено модель сенсора термічного аналізу, яка містить пасивне та активне кола. Пасивне коло представляє теплові процеси в структурі сенсора, а активне – в досліджуваній речовині. Температурний режим роботи, зокрема швидкість наростання температури, задається програмованим джерелом напруги при фіксованій швидкості наростання температури.
3. Вперше запропоновано критерії оцінки точності функціонування сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах та встановлені закономірності температурних характеристик, що уможливило оптимізацію режимів їх роботи. Показано, що при значенні опорної напруги в діапазоні від 1,2 В до 1,3 В похибка лінійної апроксимації не перевищує $0,04^{\circ}\text{C}$ в діапазоні $0 - 100^{\circ}\text{C}$. Показано, що для підвищення температурної чутливості до абсолютної температури сенсора різницевої температури на диференціальному каскаді з температурозалежним джерелом струму, напруга живлення вхідного кола струмового дзеркала повинна

бути мінімально можливою. Враховуючи вимоги нормального функціонування вхідного кола струмового дзеркала, напруга живлення цього кола має в декілька раз перевищувати падіння напруги на транзисторі (в мікроамперному режимі – це приблизно 0,5 В), що і визначає діапазон рекомендованих значень напруги вхідного кола – від 1 В до 2 В.

4. Встановлені закономірності формування інформативних сигналів в магнітотранзисторних перетворювачах функціонально-інтегрованих сенсорів термомагнітного аналізу, що забезпечило можливість реалізації трьох функціональних властивостей – формування інформативного сигналу індукції вимірюваного поля, контрольованого нагріву структури з визначенням кількості теплової енергії, що виділяється в структурі під час нагріву, та вимірювання температури структури магнітотранзистора.
5. Запропоновано метод формування первинних перетворювачів оптичних сенсорів температури на основі полімердиспергованих холестеричних рідких кристалів, що дозволило розробити системи вимірювання температури, стійкі до електромагнітних завад шляхом використання довжини хвилі як інформативного параметра, а застосування в таких системах оптичного волокна дозволило реалізувати рознесення в просторі точок детектування.

Дисертація О.В.Бойко має практично-прикладне значення. До найвагоміших практичних результатів слід віднести:

1. Розроблено сенсор різницевої температури з функцією інтегрування, який виконує функцію аналогового високоточного швидкодіючого інтегрування різниці температур в певному часовому інтервалі та характеризується високими значеннями роздільної здатності вимірювання напруги знаходиться в межах $\pm(1 - 10)$ мкВ, що відповідає роздільній здатності вимірювання температури $\pm(10^{-3} - 10^{-4})$ °С.
2. Розроблено функціонально-інтегрований термомагнітний сенсор на базі інтегральних структур латеральних магнітотранзисторів з розщепленим колектором, що забезпечує інтегрування в єдиній структурі трьох функцій – вимірювання магнітного поля, керуваного нагріву та вимірювання температури. Запропоновано використання однополярного вихідного сигналу, що підвищує енергоефективність сучасних сенсорних пристроїв з низьковольтним однополярним живленням, і може використовуватися в сучасних пристроях Інтернету Речей.
3. Розроблено сигнальний перетворювач функціонально інтегрованих сенсорів термічного аналізу ємнісного типу, що забезпечує як вимірювання температури з роздільною здатністю не гірше 0,001 °С, так і електричної ємності (не гірше 10^{-16} Ф), що дозволяє проводити вимірювання температурної деформації досліджуваного об'єкта з точністю 1 – 10 мкм.
4. Створено функціонально-інтегрований сенсор температури на основі органічних світловипромінювальних, рідкокристалічних та фото чутливих структур. При цьому в одному пристрої поєднується джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання. Такі температурні сенсори можуть використовуватися як самостійно, так і для проведення комплексних досліджень, зокрема термоаналітичних.

5. Новизна практичних розробок захищена патентами України на корисні моделі.
6. Результати дисертації використано під час дослідно-конструкторських робіт ВАТ "СКБ МП" (м.Львів), ПрАТ "Мікроприлад"(м.Львів), ПрАТ «Самбірський приладобудівний завод Омега» (м.Самбір), ДУ «Інститут травматології та ортопедії» (м.Київ), а також в навчальному процесі кафедри біобезпеки та здоров'я людини НТУУ «КПІ ім.І.Сікорського», що підтверджено відповідними актами.

Автором розроблено та експериментально підтверджено нові перспективні рішення, які можуть бути використані в процесі проектування мікроелектронних сенсорних пристроїв.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, достовірність і новизна висновків та рекомендацій, запропонованих рішень отриманих дисертантом підтверджується використанням сучасних експериментальних методик і методів, зокрема, методів аналізу та синтезу електричних кіл, теорії похибок вимірювань, структурно алгоритмічних методів підвищення точності, математичного та імітаційного моделювання елементів сигнальних перетворювачів, методів статистичного опрацювання результатів вимірювань.

Експериментальні результати отримані з використанням сучасних програмних засобів та вимірювального обладнання відображають реальні параметри сигнальних перетворювачів, які використані в процесі реалізації ряду сенсорних пристроїв та апробовані на багатьох міжнародних конференціях. Тому отримані результати можна вважати достовірними і перспективними для подальших наукових досліджень по створенню сенсорів термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки.

Однак, як і кожна наукова робота, розглянута дисертація та автореферат не позбавлені певних недоліків та зауважень. Серед них відзначу наступні:

1. Недостатньо уваги приділено обґрунтуванню вибору програмного забезпечення, а саме програми MicroCap, яка використовує SPICE моделі базових елементів твердотільної електроніки.
2. У дисертації не обґрунтовано вибір діапазону зміни різницевої температури ± 5 (± 10) °C.
3. На стор. 163 дисертації автор наводить результати модельних досліджень SPICE схем заміщення теплових моделей сенсорів термічного аналізу з саморозігрівом для декількох варіантів параметрів цих моделей. При цьому використовується ефект «розмиття» годографів фігур Ліссажу. Нажаль, автор не вказує як використати такий ефект для аналізу параметрів сенсорів термічного аналізу.
4. На стор. 171 дисертації автор вказує, що «в процесі синтезу та специфікації параметрів електротеплової SPICE моделі сенсора термічного аналізу необхідно не лише встановити функціональні взаємозв'язки між тепловими та електричними параметрами, але і вжити необхідних заходів по запобіганню нестабільності функціонування такої моделі». Проте, конкретних підходів щодо рішення проблеми запобігання нестабільності функціонування моделі в роботі не наведено.

5. На стор. 184 дисертації автор наводить залежність напруги джерела EVT у виді рівняння $EVT Value = V(VA) \cdot V(RT)$. Такий запис рівняння є некоректним, адже розмірність правої частини рівняння становить (Вольт), а лівої – (Вольт)².
6. Не наведено конструктивні особливості багатоканального оптовоконного сенсора температури з рознесеними в просторі первинними перетворювачами, наведено лише принцип його дії.
7. У дисертації зустрічаються окремі стилістичні помилки, до деяких формул наведено не повний перелік позначень.

Однак вказані зауваження і недоліки суттєво не впливають на цінність дисертації в цілому. Результати дисертації опубліковано в 50 наукових працях, зокрема у 1 монографії, 15 статтях у наукових фахових виданнях України, 7 статтях у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та WebofScience, 8 статтях у матеріалах конференцій, які індексовані у наукометричних базах даних Scopus та WebofScience, 2 статтях у наукових періодичних виданнях України, що додатково відображають результати дисертаційних досліджень, 12 працях, що опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, 5 патентах України, що підтверджує повноту висвітлення результатів дисертації у наукових працях та особистий внесок здобувача.

Анотуєреферат достатньо повно відображає зміст дисертаційної роботи, у ньому викладена основна суть проведених досліджень і отриманих результатів.

Загальний висновок. Анотуєреферат та дисертація Бойко Оксани Василівни “Функціонально-інтегровані сенсори термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки”, оформлені згідно з вимогами МОН України. На всі друковані праці здобувача, подані в дисертації є посилання. Окрім того, в анотуєрефераті та дисертації чітко сформульовано особистий внесок в роботах, написаних у співавторстві. Висновки дисертації зроблено на основі отриманих результатів автора.

Тому вважаю, що дисертаційна робота Бойко Оксани Василівни “Функціонально-інтегровані сенсори термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки” є завершеною науково-дослідницькою роботою, в якій отримано нові, науково обґрунтовані результати та практично-прикладні рішення, які в сукупності комплексно вирішують науково-прикладну проблему порозробленню наукових і практичних засад побудови та дослідження функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на основі компонентів твердотільної мікроелектроніки та багатофункціональних сигнальних перетворювачів. Робота має як теоретичне так і практичне значення в галузі створення мікроелектронних сенсорних пристроїв. За актуальністю тематики досліджень, рівнем виконання, науковою новизною отриманих результатів і прикладним значенням вона відповідає вимогам МОН України. Зміст дисертації відповідає спеціальності 05.27.01 – твердотільна електроніка, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,
професор, професор кафедри мікроелектроніки
Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського

