

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Бойко Оксана Василівна

УДК 621.382: 536.62

**ФУНКЦІОНАЛЬНО-ІНТЕГРОВАНІ СЕНСОРИ ТЕРМІЧНОГО АНАЛІЗУ
НА СТРУКТУРАХ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

05.27.01- Твердотільна електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електронних приладів Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти та науки України та на кафедрі медичної інформатики Львівського національного медичного університету ім.Данила Галицького МОЗ України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Готра Зенон Юрійович,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
завідувач кафедри електронних приладів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Вербицький Володимир Григорович,
Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського,
професор кафедри мікроелектроніки

доктор технічних наук, професор
Політанський Леонід Францович,
Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича,
завідувач кафедри радіотехніки та
інформаційної безпеки

доктор технічних наук, професор
Осадчук Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки

Захист дисертації відбудеться «28» листопада 2019 року о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий «28» жовтня 2019 р.

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.ф.-м.н., професор*



Д Д.М. Заячук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Переважна більшість природних і технічних процесів пов'язана з перетворенням теплової енергії. Знання процесів виділення чи поглинання тепла та кількісні параметри цих процесів дозволяють краще зрозуміти фізичний світ, структуру речовин, механізми хімічних і біохімічних реакцій. Інформація про значення теплових ефектів та про характер їх перебігу є однією з основних як у практиці наукових досліджень, так і при оптимізації чи контролі численних виробничих технологічних процесів. На сьогодні методи термічного аналізу знаходять своє широке застосування в біомедичних дослідженнях.

Для проведення таких досліджень широко використовуються калориметричні методи, а також методи діелектричного термічного аналізу, термомеханічного та термомагнітного аналізу, термооптометрії та термогравіметрії. Використовуючи ці методи вимірюють такі параметри, як кількість виділеної чи поглинутої теплоти в досліджуваному об'єкті, теплоємність, тепловий імпеданс, механічні зміни та деформації, параметри фазових переходів, дегідратації, термомагнітні властивості, теплову модуляцію інтенсивності поглинання та пропускання оптичного випромінювання тощо.

Проведення фізичних, хімічних, а особливо біомедичних досліджень висуває нові вимоги до сигнальних перетворювачів сенсорів термічного аналізу, що зумовлені трьома сучасними напрямками розвитку мікроелектронної сенсорики на основі структур твердотільної електроніки.

Перший з них визначається подальшим розвитком твердотільної мікро- та наноелектроніки. Подальша мініатюризація сенсорів термічного аналізу відкриває можливості для вимірювання теплових параметрів як завгодно малих об'єктів дослідження, зокрема біологічних об'єктів. У науковій літературі вже сформулювалися такі поняття, як мікрокалориметри та нанокалориметри, реалізацію яких здійснюють новітніми методами MEMs (Micro-Electro-Mechanical systems) структурування. Характерним прикладом використання наноструктурованих об'єктів у медицині та пристроях біохімічного аналізу є інкапсульовані в органічні об'єкти магнітні наночастинки. Важливими вимогами до сучасних мікроелектронних сенсорів є їх конструктивно-технологічна сумісність з базисом сучасних твердотільних (кремнієвих) інтегральних схем та відповідність новітній концепції «Лабораторія на Чипі» (Lab-on-Chip, LoC), яка передбачає реалізацію сенсорів хімічного та біохімічного аналізу на основі напівпровідникових чипів.

Другий напрямок розвитку сенсорики пов'язаний з розширенням функціональності та функціональним інтегруванням. Розширення функціональності реалізується завдяки методам диференційної скануючої калориметрії (ДСК) та її сучасних різновидів: ДСК з модуляцією температури, динамічною ДСК, ДСК з покроковим та багатокроковим скануванням. Функціональне інтегрування передбачає поєднання декількох методів дослідження в єдиний комплекс, що є особливо актуальним, оскільки використання окремого термоаналітичного методу при дослідженні нових матеріалів, нажаль, не може надати всієї необхідної інформації для розуміння їх поведінки і властивостей.

Характерним прикладом функціонального інтегрування є метод синхронного

термоаналізу, який поєднує диференційну скануючу калориметрію (ДСК) з термогравітометриєю (ТГ). Подальший розвиток функціонально-інтегрованих комплексів досліджень базується на поєднанні термічних та оптичних, магнітних, імпедансних чи механічних методів дослідження.

Поєднання магнітних і термічних методів дослідження використовується при медичній терапії злоякісних новоутворень на основі керованої гіпертермії, при цільовій доставці зв'язаних з магнітними наночастинками ліків та контрастуючих агентів при магнітній резонансній томографії, біомагнітній сепарації клітин та бактерій, виділенні та очищенні білків, нуклеїнових кислот, полінуклеотидів, тощо. Інтегрування термічних та оптичних методів забезпечує можливість виявлення впливу фазових переходів досліджуваної речовини на її спектральну характеристику. З допомогою імпедансних методів можливо більш точно встановити параметри фазових переходів речовини.

І накінець, третій важливий напрямок розвитку сенсорики на основі структур твердотільної електроніки визначається новітніми тенденціями розвитку інформаційних технологій, які оперують концепціями програмованих систем на кристалі (Programmable System-on-Chip, PSoC), Інтернету Речей (Internet of Things, IoT), Індустріального Інтернету Речей (Industrial Internet of Things, IIoT), Інтернету фізичного світу (Physical World Internet). Розвиток у цьому напрямку передбачає вирішення значної кількості проблем, зокрема, подальшого підвищення параметрів аналогового фронт-енду (Analog Front-end) сенсорів, які забезпечують взаємодію цифрової мережі Інтернет з фізичним світом.

Відповідно до цих напрямків у роботі формулюється концепція побудови функціонально інтегрованих сенсорів термічного аналізу на основі компонентів твердотільної мікроелектроніки та багатофункціональних сигнальних перетворювачів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації 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). Робота виконувалась за підтримки ПрАТ «СКБ МП» та ПрАТ «Самбірський приладобудівний завод Омега», які використали результати дисертаційних досліджень в дослідно-конструкторських роботах.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення наукових та практичних засад побудови функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на основі структур твердотільної електроніки.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити та дослідити:

– методи та засоби оптимізації структурно-схемних рішень, які б дозволили лінеаризувати функцію перетворення, підвищити швидкодію вимірювання температури, компенсувати вплив опору ліній зв'язку в терморезистивних сенсорах та компенсувати вплив температури вільних кінців в термоелектричних сенсорах;

– підходи функціонального інтегрування структур твердотільної електроніки в мікроелектронних сенсорах термічного аналізу, на основі якої забезпечується використання єдиної мікроелектронної структури для керованого нагріву досліджуваного зразку, вимірювання температури чи різниці температур між досліджуваним та опорним зразками, вимірювання зміни фізичних характеристик досліджуваного зразка в процесі модуляції його температури;

– режими роботи сенсорів термічного аналізу на основі структур твердотільної електроніки, що забезпечили б функціональне інтегрування контрольованого тепловиділення та вимірювання температури;

– методики аналізу розподілу струму в напівпровідникових структурах мультифункціональних транзисторних перетворювачів, які забезпечують керований самонагрів та вимірювання температури;

– SPICE моделі сенсорів термічного аналізу, що забезпечують можливість дослідження теплових процесів у сигнальних колах на транзисторних структурах з врахуванням теплової релаксації та ефектів акумуляції теплової енергії в процесі фазових переходів досліджуваних речовин, та підходи до їх універсалізації;

– підходи підвищення ефективності аналізу теплових параметрів досліджуваних структур чи первинного перетворювача сенсорів термічного аналізу методом синтезу та аналізу фігур Лісажу;

– методи оптимізації режиму роботи сенсорів різницевої температури та визначити критерії оцінки точності їх функціонування;

– підходи до використання рідкокристалічних матеріалів в сенсорах термічного аналізу для вимірювання абсолютної та різницевої температури з можливістю рознесення в просторі точок вимірювання;

– функціонально-інтегрований сенсор температури на основі органічних світловипромінювальних, фоточутливих та оптично активних матеріалів та структур;

– функціонально-інтегрований термомагнітний сенсор на основі інтегральних структур латеральних магнітотранзисторів, що забезпечить вимірювання магнітного поля, керований нагрів і вимірювання температури та провести його параметричний аналіз;

– сенсор різницевої температури з функцією аналогового високоточного швидкодіючого інтегрування різниці температур в певному часовому інтервалі;

– функціонально-інтегрований сенсор термічного аналізу на основі поєднання термічних та ємнісних методів з використанням високоточного ємнісного конвертера AD7747.

Об'єкт дослідження – процеси вимірювання теплових величин та теплофізичних характеристик біологічних і фізичних об'єктів.

Предмет дослідження – методи та засоби термічного аналізу на базі мікроелектронних та оптоелектронних сенсорів теплових величин.

Методи дослідження. Дослідження базуються на використанні експериментальних методів твердотільної електроніки, 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.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено та реалізовано нові підходи до побудови мікроелектронних сенсорів термічного аналізу на основі структур твердотільної електроніки, новизною яких є функціональне інтегрування - використання єдиної мікроелектронної структури перетворювача для керованого нагріву досліджуваного зразка чи середовища відповідно до заданого алгоритму модуляції теплового потоку, вимірювання температури чи різниці температур між досліджуваним та опорним зразками, а також вимірювання зміни функціональних характеристик (калориметричних, термомагнітних, термооптичних, термомеханічних, термоімпедансних) досліджуваного зразка в процесі модуляції його температури.

2. Вперше розроблено метод модельного SPICE дослідження та параметричного аналізу мікроелектронних сенсорів термічного аналізу на основі електротеплової аналогії, що на відміну від відомих, враховує ефект акумуляції теплової енергії при фазових переходах досліджуваної речовини. Електротеплова аналогія реалізується SPICE моделями, в яких реалізовано функціональне заміщення теплових характеристик на електричні аналоги, зокрема різниця температур $\Delta T(t)$ заміщається різницею напруг $\Delta U(t)$; тепловий потік Φ_T чи потужність P_T заміщається електричним струмом I_T ; тепловий опір R_θ та теплоємність C_θ заміщається еквівалентними їм електричним опором R_T та ємністю C_T конденсатора; тепла енергія при фазових переходах заміщається керованими колами на ключах типу S(V-Switch) та $R_\theta C_\theta$ ланках.

3. Вперше розроблено та специфіковано новий функціональний компонент SPICE моделювання сигналів в сенсорах термічного аналізу -Thermicap (термікап), функціонування якого базується на логічних функціях керованих ключів типу S(V-Switch): $F_T = 1$ if $\{V_{TH} > V_{TM} \& V_{CM} < V_{TM} + V_{DT}\}$ OR $\{V_{CM} > V_{TM} \& V_{TH} < V_{TM} + V_{DT}\}$ else $F_T = 0$, де: if та else – умова «якщо ... то, інакше ...»; & - логічна операція І; OR - логічна операція АБО; V_{TH} – вхідна напруга (еквівалент температури активної ділянки первинного перетворювача сенсора термічного аналізу); V_{TM} – напруга джерела, яке специфікує поріг перемикання (еквівалент температури фазового переходу); V_{CM} – напруга на конденсаторі C_M , заряд якого є функціональним аналогом накопиченої енергії фазового переходу; V_{DT} – напруга джерела, яке специфікує гістерезис перемикання, що уможливило модельне представлення ефекту акумуляції теплової енергії в процесі фазових переходів досліджуваної речовини.

4. Вперше на основі синтезу теплових годографів Ліссажу, які отримують співставленням амплітудно-фазових характеристик напруги (функціональний аналог температури) та струму (функціональний аналог теплового потоку), встановлено можливість підвищення інформативності, спрощення структурно-схемної реалізації та мінімізації енергоспоживання сенсорів термічного аналізу, що досягається

підбором частоти прямокутних імпульсів розігріву за критерієм максимально можливої модуляції форми, нахилу та девіації годографа.

5. Вперше запропоновано критерії оцінки точності функціонування сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах та встановлені закономірності температурних характеристик, що уможлиблює оптимізацію режимів їх роботи. Показано, що при номінальній температурі $t_{NOM} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ похибка лінійної апроксимації не перевищує значення $0,025\text{ }^{\circ}\text{C}$ і практично не залежить від опорної напруги, а при відхиленні від номінального значення - зростає і має виражену залежність від опорної напруги. Встановлено, що при граничних значеннях абсолютної температури $t_{MIN} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $t_{MAX} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ максимальне значення модуля похибки лінійної апроксимації при $U_{REF} = 1.0\text{ В}$ збільшується до $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при значенні опорної напруги U_{REF} в діапазоні від $1,2\text{ В}$ до $1,3\text{ В}$ похибка лінійної апроксимації не перевищує $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ в діапазоні $0 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6. Набули подальшого розвитку методи формування інформативних сигналів в магнітотранзисторних перетворювачах функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу, що базуються на модуляції струму емітера та перемиканні режимів роботи р-n переходів магнітотранзисторної структури. Це дозволило реалізувати однокомпонентні термомагнітні сенсори з функцією вимірювання магнітного поля, керованого «in-situ» нагрівання та вимірювання температури.

7. Виявлені закономірності формування компенсаційного струму в залежності від зміни температури і напруги на терморезисторі та впливу керованого нагріву на перехідні процеси, що дозволило розробити незалежні від впливу опорів ліній зв'язку сигнальні перетворювачі терморезистивних сенсорів з покращеними динамічними характеристиками - час вимірювання температури менший від $0,5\tau_0$ (τ_0 - постійна часу терморезистора), абсолютна похибка нелінійності не перевищує $0,01\%$ в діапазоні $0 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

8. Вперше запропоновано систему моніторингу температури з рознесенням в просторі точок вимірювання на основі рідкокристалічних полімер-диспергованих первинних перетворювачів, що забезпечується використанням рідкокристалічних матеріалів з різними температурними залежностями максимуму селективного відбивання, що уможлиблює використання одного оптичного каналу для вимірювання температури.

9. Вперше синтезовано структуру функціонально-інтегрованого сенсора температури на основі органічних світловипромінювальних та фоточутливих матеріалів, яка на відміну від відомих поєднує джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання. Отримані структури мають високу температурну чутливість $30\text{ нм}/^{\circ}\text{C}$, що в основному визначаються параметрами рідкокристалічного матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено SPICE моделі та підходи модельних досліджень функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на основі електротеплової аналогії, що забезпечують можливість параметричного аналізу з врахуванням ефекту акумуляції теплової енергії при фазових переходах досліджуваної речовини.

2. Розроблено практичні рекомендації щодо реалізації сигнальних перетворювачів функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки, що 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.

3. Розроблено високочутливий сенсор різницевої температури з поєднанням аналогового інтегрування та аналого-цифрового перетворення високопрецизійним мікроконвертером на основі 24-бітного сигма-дельта (Σ - Δ) модулятора. Інтегрування здійснюється високопрецизійними операційними підсилювачами за принципом модуляції-демодуляції сигналу, що забезпечує мінімальні значення напруги зміщення (1 мкВ) та її нестабільності (0,005 мкВ/°С). Експериментальними дослідженнями показано, що роздільна здатність вимірювання різниці температури становить $\pm(10^{-3} - 10^{-4})^\circ\text{C}$.

4. 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, керованого нагріву та вимірювання температури. Запропоноване рішення забезпечує подальшу мініатюризацію сенсорів та уможливорює проведення «in-situ» вимірювань однокомпонентним функціонально-інтегрованим сенсором. Запропоновано схемне рішення щодо переходу від двополярних сигналів в магнітотранзисторних сенсорах до ефективнішого однополярного вихідного сигналу, що забезпечує високу енергоефективність сучасних сенсорних пристроїв з низьковольтним однополярним живленням, зокрема Інтернету Речей. Реалізація сигнального перетворювача здійснена на базі модуля CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit.

5. Розроблено сигнальний перетворювач функціонально інтегрованих сенсорів термічного аналізу ємнісного типу, що характеризується високими значеннями роздільної здатності вимірювання температури (не гірше 0,001°С) та електричної ємності (не гірше 10^{-16} Ф), що забезпечує можливість вимірювання температурної деформації досліджуваного об'єкта. Пріоритетними областями застосування таких функціонально інтегрованих сенсорів є термомеханічний, дилатометричний та термогравіметричний аналіз. Сигнальний перетворювач ємнісного типу базується на високопрецизійному 24-бітному конвертері AD7747 (24-Bit Capacitance-to-Digital Converter) компанії Analog Devices.

6. Вдосконалено вимірювальні терморезистивні перетворювачі типу ЕП4701АС і ЕП4703АС, що виготовляються ПрАТ «СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні», м. Львів, шляхом лінеаризації функції перетворення.

7. Запропонований метод і схемотехнічні рішення компенсації впливу температури вільних кінців термоелектричних перетворювачів на основі плівкової технології використано при модернізації термоелектричних перетворювачів ЕП4700АС і ЕП4702АС в ПрАТ «СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні» та в

схемах компенсації температурної зміни електрорушійної сили нормальних термостатованих елементів типу Х488/1-4 (ПрАТ "Мікроприлад").

8. Запропонований метод корекції впливу опору ліній зв'язку в терморезистивних перетворювачах використано на ПрАТ Самбірський приладобудівний завод «Омега».

9. Запропоновано конструктивні рішення функціонально інтегрованого сенсора температури на основі органічних світловипромінювальних та фоточутливих матеріалів, де в одній структурі об'єднано джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання. Структури такого типу можуть бути використані як самостійний сенсор температури або як елемент сенсора термічного аналізу для вимірювання температури досліджуваного та опорного зразків. Це уможливило проведення високоточного вимірювання різниці температури у вузькому діапазоні, що є особливо актуальним при проведенні медико-біологічних досліджень.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно, здійснено вибір наукового напрямку досліджень, запропоновано мету та завдання роботи, вибрано об'єкт і предмет досліджень, здійснено пошук, аналіз та систематизацію літературних даних щодо основних напрямків, переваг і досвіду застосування термоаналітичних методів та побудови сенсорів термічного аналізу. Основні результати досліджень та структурно-параметричної модифікації сенсорів термічного аналізу наведено в монографії [1]. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать основні засади та принципи побудови функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу [17, 19, 31, 37, 41, 43], розроблення, дослідження та оптимізація режимів роботи сенсорів різницевої температури [2, 8, 9, 10, 36, 49], розроблення та дослідження електротеплових SPICE моделей сенсорів термічного аналізу [7], методи підвищення швидкодії вимірювання температури [18, 25, 28, 40], метод компенсації впливу опорів ліній зв'язку [6], методи компенсації впливу температури вільних кінців термопари [16, 21, 23, 32, 33, 46, 47], методи лінеаризації терморезистивних перетворювачів [13, 22, 26, 44, 45], розроблення та дослідження сенсорів температури на основі холестеричних рідких кристалів [14, 20, 24, 27, 42, 48], дослідження полімер-диспергованих рідких кристалів [5, 11, 29, 30, 38, 39], дослідження сенсорів магнітного поля [12, 15, 34, 35].

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати досліджень, які викладено у дисертації, представлено на таких наукових конференціях: 6th International Conference «New electrical and electronic technologies and their industrial implementation: NEET 2009» (Zakopane, Poland, 2009), Advanced Numerical Modelling: IPhDW, (Poland, Zielona Gora, 2011), II Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, 2012), 14 Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Одеса, 2013), науково-практичній конференції з міжнародною участю «Сучасні здобутки медичної інформатики» (Київ, 2013), III міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, 2013), XII International

Conference «Modern problems of radio Engineering, telecommunications, and computer science», (Lviv-Slavske, 2014), 13th International Scientific Conference on Optical Sensors and Electronic Sensors (Lodz, Poland, 2014), XXXVI Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments (Wilga, Poland, 2015), 10-th International conference «Electronic processes in organic and inorganic materials» (Ternopil, 2016), V Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберегання інформації в інфокомунікаційних системах» (Чернівці, 2016), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Промислова автоматизація в Україні. Просвіта та підготовка кадрів» (Львів, 2016), XIII International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science TCSET'2016» (Lviv-Slavske, 2016), 4-й міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (Вінниця, 2017), 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies AICT'2017 (Lviv, 2017), 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering TCSET'2018 (Lviv-Slavske, 2018), XLII-nd IEEE-SPIE Joint Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments (Wilga, Poland, 2018), 11th International conference «Electronic processes in organic and inorganic materials» (Ivano-Frankivsk, 2018), IV міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (Львів, 2019).

Публікації. Основні результати дисертації викладені 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 Web of Science, 8 статтях у матеріалах конференцій, які індексовані у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science, 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.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 263 найменувань та додатків. Робота викладена на 280 сторінках основного тексту, включає 266 рисунків та 10 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання досліджень. Визначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертаційних досліджень та публікації.

У першому розділі проведено аналіз принципів побудови та тенденцій розвитку сенсорів термічного аналізу.

Описано і проаналізовано основні напрямки, переваги і досвід застосування термоаналітичних, зокрема калориметричних методів дослідження. Розглянуто

основні принципи реалізації сенсорів термічного аналізу та визначено передумови їх розвитку, серед яких: забезпечення можливості аналізу гранично малих об'ємів досліджуваних речовин, конструктивно-технологічна сумісність з базисом сучасних твердотільних (кремнієвих) інтегральних схем та відповідність новітній концепції «Лабораторія на Чипі» (Lab-on-Chip, LoC), що передбачає реалізацію сенсорів хімічного та біохімічного аналізу на основі напівпровідникових чипів, розширення функціональності та функціональне інтегрування, яке передбачає поєднання декількох методів дослідження в єдиний комплекс.

Подальший розвиток сенсорів термічного аналізу також обумовлений розвитком новітніх мікроелектронних пристроїв, їх системотехніки, мікросхемотехніки сигнальних перетворювачів, математичного, модельного та програмного забезпечення. Розвиток математичного забезпечення передбачає удосконалення математичних моделей сенсорів термічного аналізу та їх реалізації програмними засобами сучасної інформатики, а розвиток апаратного забезпечення обумовлюється вимогами інтерфейсної сумісності з персональними комп'ютерами та мобільними платформами. В останні роки особливий вплив на розвиток сенсорних пристроїв мають новітні концепції програмованих систем на кристалі (Programmable System-on-Chip, PSoC), Інтернету Речей (Internet of Things, IoT), Індустріального Інтернету Речей (Industrial Internet of Things, IoT), Інтернету фізичного світу (Physical World Internet). Таким чином подальший розвиток сигнальних перетворювачів сенсорів термічного аналізу обумовлений розширенням функціональності та функціональним інтегруванням, використанням новітніх компонентів мікро- та наноелектроніки, мінімізацією енергоспоживання, можливістю функціонування з низьковольтними однополярними джерелами живлення.

У другому розділі розглянуто можливості вдосконалення сигнальних перетворювачів терморезистивних та термоелектричних сенсорів, що використовуються при термічному аналізі для забезпечення керованого нагріву та вимірювання температури в широкому діапазоні.

Для забезпечення лінійності мостових терморезистивних схем запропоновано використання двошарових плівкових структур з протилежними за знаком температурними коефіцієнтами опору (ТКО). Послідовне з'єднання терморезистивних елементів (рис.1) забезпечує стабільність струму в колах мостової схеми, що підвищує лінійність вихідних сигналів. При цьому реалізовано можливість вимірювання як абсолютної, так і різницевої температури.

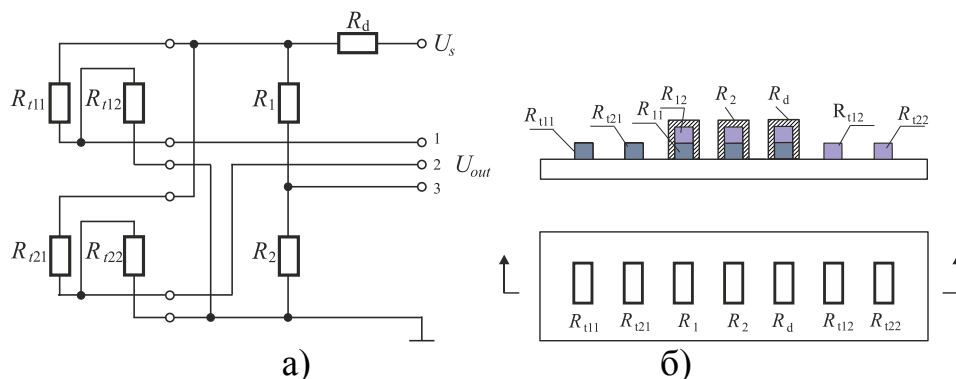


Рис.1. Резистивна мостова схема для вимірювання абсолютної та різницевої температури (а) та її конструктивне виконання (б)

У випадку використання плівкових платинових терморезисторів, які забезпечують високу стабільність вимірювання температури, для забезпечення лінійності перетворення зміни опору терморезистора в напругу запропоновано метод вимірювання на основі пропускання зразкового струму через терморезистор (рис. 2.а). Для компенсації початкового значення опору платинового терморезистора при 0°C або при початковій температурі вимірювання послідовно з ним під'єднано зразковий резистор, значення якого вибираються рівними значенню опору платинового терморезистора при відповідних температурах. Лінеаризація функції перетворення терморезистора відбувається шляхом формування температурозалежної складової зразкового струму. При пропусканні компенсаційного струму через терморезистор і зразковий резистор компенсується квадратична складова функції перетворення, але при цьому додатково виникає кубічна складова вихідного сигналу. Похибка нелінійності не перевищує $0,2^{\circ}\text{C}$ в температурному діапазоні від 0 до 400°C і $1,5^{\circ}\text{C}$ в діапазоні від 0 до 800°C (рис. 2.б, 2.в). Пропускання компенсаційного струму тільки через терморезистор дозволило зменшити похибку нелінійності і спростити схему. Розроблено терморезистивний сенсор, який містить стабілізатор зразкового струму, побудований на операційному підсилювачі (ОП) ОА1 і джерелі зразкової напруги U_0 , перетворювач зміни опору терморезистора в напругу на ОП ОА2 і вихідний підсилювач на ОП ОА3.

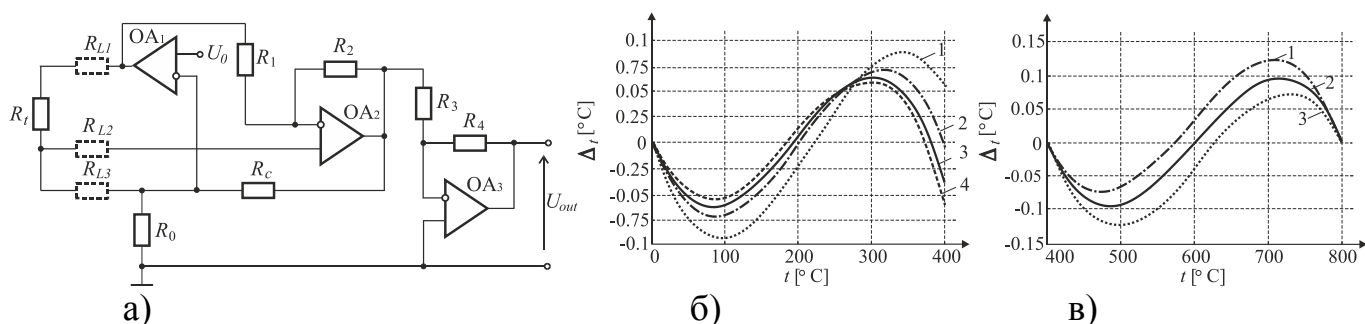


Рис. 2. Принципова схема терморезистивного перетворювача з формуванням компенсаційного струму (а) та графічні залежності абсолютної похибки нелінійності перетворювача в діапазонах: $0 - 400^{\circ}\text{C}$ (б) для 1 – $R_c=2550$ Ом; 2 – $R_c=2570$ Ом; 3 – $R_c=2558$ Ом; 4 – $R_c=2559$ Ом; $400 - 800^{\circ}\text{C}$ (в) для: 1 – $R_c=2158$ Ом; 2 – $R_c=2148$ Ом; 3 – $R_c=2138$ Ом

При використанні запропонованого методу похибка нелінійності не перевищує $\pm 0,01\%$ в діапазоні $0 - 800^{\circ}\text{C}$.

У випадку розміщення первинного і вторинного перетворювача сенсора термічного аналізу на значних відстанях (контроль технологічних процесів на хіміко-фармацевтичних підприємствах) необхідно враховувати вплив опорів ліній зв'язку на точність вимірювання. Для компенсації їх впливу вперше використано метод комутаційного інвертування.

Реалізацію даного методу здійснено шляхом послідовного з'єднання з терморезистором первинного терморезистивного перетворювача зразкового резистора та полярного комутатора, що розміщуються на його контактних

елементах, та введення у вторинний терморезистивний перетворювач додаткового джерела зразкового струму протилежної полярності і тактового генератора, що забезпечують комутацію зразкових струмів. При цьому на входах ліній зв'язку формуються напруги додатної і від'ємної полярності, після усереднення яких компенсується вплив опорів ліній зв'язку. Для усереднення напруг запропоновано використовувати пристрої відбору та зберігання (ПВЗ) (рис. 3).

Для спрощення схеми комутації стабілізатор зразкового струму від'ємної полярності I_{0-} постійно під'єднаний до лінії зв'язку R_{L1} , а стабілізатор струму додатної полярності I_{0+} під'єднується до лінії зв'язку діодним комутатором на діодах D1, D2.

При цьому на входах лінії зв'язку формуються напруги

$$U_{in-} = I_{0-}(R_{L1} + R_{L2} + R_t) - \Delta U_{Q1}, \quad 0 \leq \tau \leq \frac{T}{2}, \quad (1)$$

$$U_{in+} = (I_{0+} + I_{0-})(R_{L1} + R_{L2} + R_0) + \Delta U_{Q2}, \quad \frac{T}{2} \leq \tau \leq T, \quad (2)$$

де T – значення періоду вихідних імпульсів такого генератора; τ – час перетворення; R_t – значення опору терморезистора при температурі t ; R_{L1} , R_{L2} – значення опору ліній зв'язку; ΔU_{Q1} , ΔU_{Q2} – напруги база-емітер транзисторів Q1 і Q2.

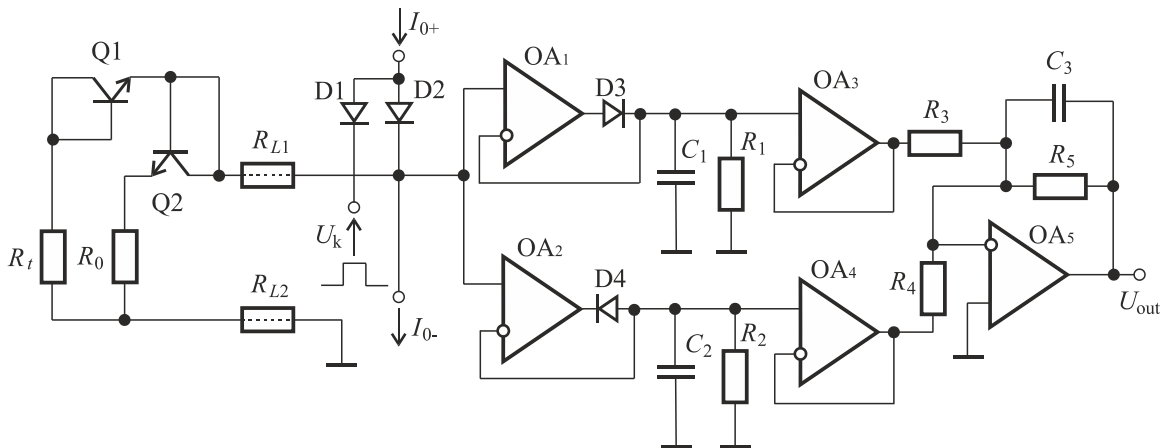


Рис. 3. Принципова схема терморезистивного перетворювача з компенсацією впливу опорів ліній зв'язку

Напруги додатної та від'ємної полярності запам'ятовується на конденсаторах C_1 та C_2 , відповідно, та усереднюються на вихідному підсилювачі OA_5 . При виконанні умови $I_{0+}=2|I_{0-}|$ отримаємо

$$U_{out} = \frac{1}{2} I_{0+} (R_t - R_0). \quad (3)$$

Запропонований метод на основі комутаційного інвертування зразкового вимірювального струму дозволяє підвищити швидкодію і повністю компенсувати вплив опорів ліній зв'язку в діапазоні $0 - 30$ Ом на похибку вимірювання температури. При цьому перехідні процеси в момент комутації зразкових струмів на похибку і швидкодію вимірювання не впливають.

Проведено дослідження динамічних характеристик терморезистивних сенсорів. Для підвищення їх швидкодії та зменшення відбору тепла від об'єкту дослідження використовують попередній нагрів терморезистора до початкового значення

температури діапазону вимірювання. Цей метод дозволяє розширити функціональність терморезистивних сенсорів, забезпечивши одночасний нагрів і вимірювання температури.

Нагрів терморезистора проводиться струмом нагріву, який контролюється аналоговими або цифровими методами.

У початковий момент при зміні температури об'єкта дослідження залежність зміни опору терморезистора від часу описується виразом

$$R_t - R_m = (R_{tm} - R_m) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \right), \quad (4)$$

де R_{tm} , R_m – значення опору терморезистора при вимірюваній температурі t_m та початковій температурі t_n ; τ – час від моменту контакту терморезистора з об'єктом вимірювання температури; τ_0 – постійна часу терморезистора.

Для підвищення швидкодії запропоновано проводити вимірювання опору терморезистора у визначений момент часу перехідного процесу з наступним обчисленням значення вимірюваної температури.

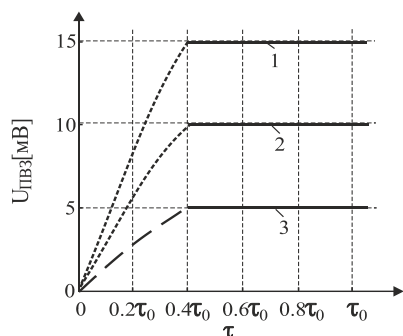


Рис.4. Графічні залежності вихідної напруги ПВЗ від часу для різних діапазонів зміни значення опору терморезистора: 1 – 15 Ом, 2 – 10 Ом, 3 – 5 Ом при часовому інтервалі $0,4\tau_0$

Також запропоновано методи компенсації температури вільних кінців термоелектричних перетворювачів. Розроблено компенсаційну схему на основі плівкової технології виготовлення резистивних термозалежних мостових схем. Підвищення чутливості термоелектричних перетворювачів досягається шляхом використання термобатарей з кількох термопар. Однак збільшення кількості термопар призводить до збільшення розмірів сенсора та зростання теплового шуму. Таким чином, подальший розвиток сенсорів термічного аналізу, особливо для проведення біомедичних досліджень пов'язаний з пошуком нових рішень щодо підвищення чутливості та мінімізації розмірів таких сенсорів.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи формулюється концепція побудови функціонально інтегрованих сенсорів термічного аналізу на основі компонентів твердотільної мікроелектроніки, зокрема транзисторних структур, та багатофункціональних сигнальних перетворювачів. Під функціональним інтегруванням розуміється можливість використання однієї і тієї ж

Напруга на терморезисторі підсилюється з

коефіцієнтом $k = 1 / \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \right)$ і

запам'ятовується пристроєм відбору та зберігання (ПВЗ).

Показано, що час встановлення вихідного сигналу не залежить від діапазону зміни значення опору терморезистора (рис.4), а в основному залежить від моменту запам'ятовування, що визначається точністю формування часового інтервалу. При цьому час вимірювання зменшується до величини сформованого часового інтервалу.

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.

В узагальненому вигляді вимірювальний перетворювач сенсорів теплових величин з функціональним in-situ інтегруванням (рис. 5) реалізується чотирма взаємопов'язаними процесами:

- активації теплових процесів – A_Q ;
- вимірювання температури - M_T ;
- активації фізичного впливу на об'єкт дослідження, зокрема, формування магнітного поля, світлового випромінювання чи механічного напруження - A_P ;
- вимірювання результату дії фізичного впливу на об'єкт дослідження - M_P .

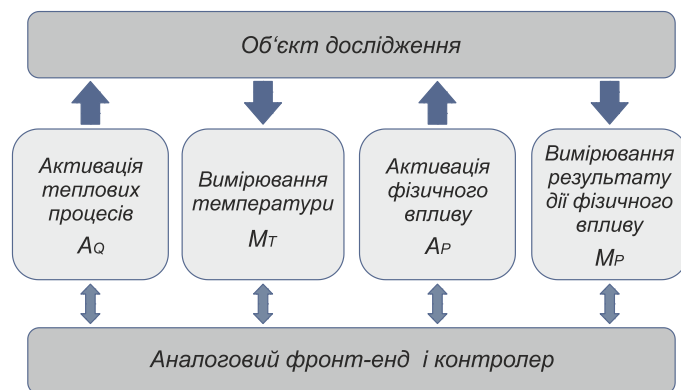


Рис. 5. Узагальнене представлення функціонально інтегрованого сенсора термічного аналізу

Термін «in-situ» використано за аналогією до вимірювання параметрів безпосередньо в об'єкті дослідження, зокрема живому організмі, чи калібрування сенсора без його вилучення з об'єкту вимірювання. В даному разі під терміном «in-situ» будемо розуміти здатність сенсора термічного аналізу формувати кероване нагрівання та вимірювання температури без використання традиційних нагрівників. Таке кероване тепловиділення та вимірювання температури реалізується за допомогою єдиного компонента, що може забезпечити вищезгадані процеси формування та вимірювання параметрів фізичного впливу.

Керування процесами з функціональним in-situ інтегруванням здійснюється сигнальним перетворювачем, який типово містить аналоговий фронт-енд (Analog Front-End) та контролер (Controller). Цей сигнальний перетворювач є невід'ємним компонентом сенсора термічного аналізу, адже алгоритм керування процесом вимірювання є набагато складнішим, ніж це має місце в традиційних монофункціональних сенсорах. У даному контексті під складністю розуміють, власне, не інтегрування різних сенсорів в єдиний модуль, а реалізацію нових функцій вимірювального перетворення на основі актюаторів та сенсорів фізичних величин.

Очевидною перевагою сенсорів термічного аналізу з функціональним in-situ інтегруванням є мініатюрність та здатність проводити параметричний аналіз гранично малих об'ємів досліджуваних речовин з їх розміщенням безпосередньо на напівпровідникових структурах, зокрема, p-n переходах чи сенсорах магнітного поля, вимірювальних перетворювачах ємнісного типу тощо.

Враховуючи новітні тенденції та передумови подальшого розвитку сенсорів

термічного аналізу, здебільшого калориметричних сенсорів сучасних типів, в дисертаційній роботі запропоновано підходи в реалізації концепції функціонального in-situ інтегрування на основі біполярних та польових транзисторів, зокрема, мікропотужних та потужних інтегральних транзисторів із зустрічно-смуговою топологією, мультитранзисторних матриць, складених транзисторних структур.

Запропонована концепція забезпечує декілька принципово важливих переваг. По-перше, реалізація сенсорів термічного аналізу, і зокрема, мікрокалориметрів, на транзисторних структурах є передумовою подальшого прогресу у вирішенні актуального завдання мінімізації чутливих елементів та зменшення маси досліджуваних біопроб. По-друге, реалізація чутливих елементів сенсорів термічного аналізу відповідає критеріям сумісності з технологіями твердотільної мікроелектроніки, концепції «Лабораторія на Чипі», а відтак уможливає інтегрування в єдиному кристалі чутливих елементів та сигнальних перетворювачів. По-третє, використання конструктивно-технологічних базисів сучасних твердотільних інтегральних схем розширює можливості параметричної гнучкості. Так, при використанні ізоляції елементів зворотньо-зміщеними p-n переходами забезпечується висока теплопровідність активної частини вимірювального перетворювача, що оптимально задовольняє вимогам модуляційної диференційної скануючої калориметрії з періодичним швидким нагрівом та охолодженням. І, по-четверте, функціональне інтегрування з використанням магнітотранзисторів чи фототранзисторів забезпечує, як вищезгадані переваги мініатюризації, так і розширення функціональності, що базується на поєднанні термічних та нетермічних методик дослідження.

У роботі проведено аналіз режимів роботи двофункціональних транзисторних перетворювачів, які забезпечують керований нагрів та вимірювання температури. В таких перетворювачах нагрів здійснюється керованою тепловою потужністю, що розсіюється на транзисторі, а вимірювання температури – відповідним вимірюванням одного з температурозалежних параметрів. Запропоновано принципи функціонування та проведено параметричний аналіз кіл керування двофункціональних транзисторних перетворювачів. Основою запропонованих рішень є джерела струму та кола зворотного зв'язку, за допомогою яких забезпечується незалежне керування напругою та струмом кола транзистора.

Показано, що використання транзисторів в сенсорах термічного аналізу потребує розуміння та врахування нерівномірності розподілу струмів в структурі транзистора чи перерозподілу струмів між транзисторами в матриці, які обумовлюють значний градієнт температур. У зв'язку з цим були запропоновані підходи щодо компенсації нерівномірності розподілу струмів в двофункціональних транзисторних структурах.

У четвертому розділі дисертації представлено комплексну методику SPICE моделювання та дослідження структур сенсорів термічного аналізу, новизною якої є можливість параметричного аналізу вимірювальних кіл з врахуванням ефекту акумуляції теплової енергії. Актуальність поставленої задачі обумовлена важливістю поєднання оптимізації конструктивних рішень сенсорів термічного аналізу, схемотехніки їх сигнальних перетворювачів та відповідних режимів досліджень.

Отримала подальший розвиток концепція електротеплової аналогії, яка полягає в заміщенні теплових характеристик на їх електричні аналоги: різниця температур $\Delta T(t)$ заміщається різницею напруг $\Delta U(t)$, 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, зокрема, вирази часової залежності температури $\Delta T(\tau)$ заміщаються відповідними виразами залежності напруги $\Delta U(\tau)$:

$$\text{в процесі нагріву - } \Delta T(\tau) = P_T \sum_{i=1}^n R_{\theta i} \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_i}\right) \right) \Rightarrow \Delta U(\tau) = I_T \sum_{i=1}^n R_{Ti} \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_i}\right) \right), \quad (5)$$

$$\text{в процесі остигання - } \Delta T(\tau) = P_T \sum_{i=1}^n R_{\theta i} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_i}\right) \Rightarrow \Delta U(\tau) = I_T \sum_{i=1}^n R_{Ti} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_i}\right), \quad (6)$$

де P_T - потужність, $\tau_i = R_i C_i$ - постійна часу i -тої ланки, n – кількість ланок.

Залежно від складності структури з тепловою релаксацією та точності розрахунку використовують від однієї до п'яти ланок. Зокрема, для структур інтегральної електроніки, такими ланками електротеплової моделі є: активна ділянка виділення тепла (р-п перехід) – кристал інтегральної структури (здебільшого, кремній); кристал – прокладка (клей, припій), прокладка – корпус, корпус – радіатор (при його наявності); радіатор – оточуюче середовище (повітря).

У роботі показано, що при дослідженні теплових процесів ефективним рішенням є аналіз цих процесів за, так званими, тепловими фігурами (годографами) Ліссажу, які отримують співставленням напруги (температури) та струму (теплової потужності). Приклади таких досліджень наведено на рис. 6. Інформативними параметрами теплових фігур Ліссажу є розмах та нахил годографа, а також його «розмиття». Наявність останнього свідчить про тривалість та інтенсивність процесу теплової релаксації.

З розвитком мікропроцесорної техніки побудова сенсорів термічного аналізу на основі аналізу процесів за параметрами та «розмиттям» теплових фігур Ліссажу набуває нового змісту, оскільки уможлиблює зберігання великих масивів даних та використання різноманітних засобів математичного аналізу кількісних параметрів температурної модуляції їх годографів.

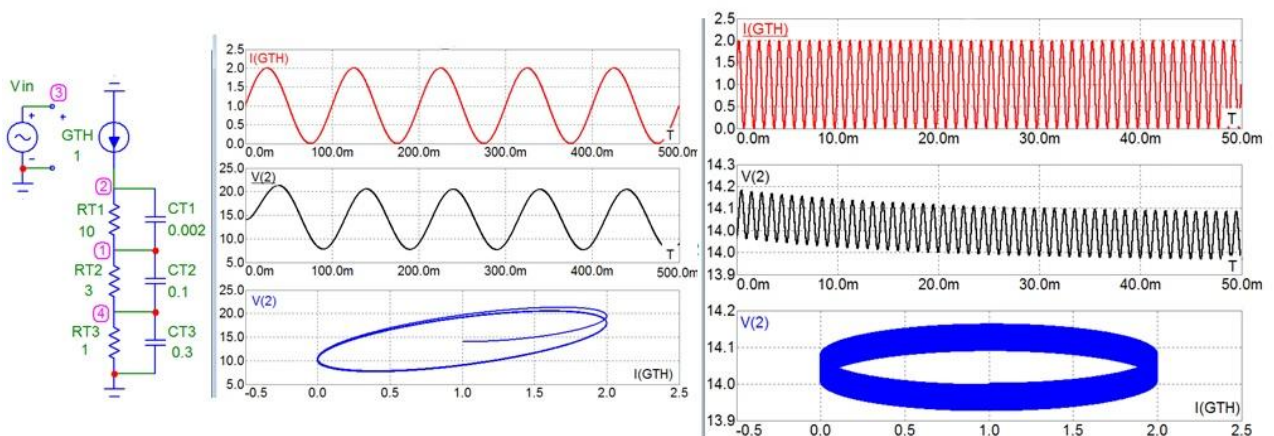


Рис. 6. Часові епюри струму, напруги та їх співставлення

Запропоновано подальший розвиток методів електротеплової аналогії для синтезу схем заміщення SPICE моделей сенсорів термічного аналізу. Основними інформативними величинами таких сенсорів є температура фазового переходу (плавлення, склування, кристалізації тощо) досліджуваної речовини та кількість теплової енергії, яка поглинається чи виділяється в процесі такого переходу. Проблема синтезу моделей сенсорів термічного аналізу обумовлена необхідністю коректного представлення перехідних процесів, які виникають при фазових переходах. При цьому, крім вже згаданих RC ланок електротеплової моделі структури сенсора, повинні бути передбачені такі її параметри як температура, кількість теплової енергії, гістерезис та швидкість фазового переходу досліджуваної речовини.

Спрощений варіант електротеплової SPICE моделі сенсора термічного аналізу, що відповідає вказаним вимогам, наведено на рис. 7.а. Модель містить пасивне та активне кола. Пасивне коло представляє теплові процеси в структурі сенсора, а активне – в досліджуваній речовині. Напруга U_{TA} є формальним аналогом температури оточуючого середовища T_A , напруга U_{TM} – температури фазового переходу T_M , а напруга U_{TH} – температури на границі між активною поверхнею перетворювача та досліджуваною речовиною.

Залежно від конструкції сенсора термічного аналізу пасивне коло може містити декілька RC ланок (зокрема, $R_{T1}C_{T1}$, $R_{T2}C_{T2}$, $R_{T3}C_{T3}$). Нагрів структури здійснюється струмом I_H керуваного джерела CCS, яке, відповідно до заданої методики дослідження, визначає режими роботи. Це можуть бути режими з сталою енергією нагріву та сталою швидкістю нагріву чи їх модуляцією. Параметри режимів нагріву задаються керуючим сигналом Cont-H.

Активне коло представлено ланкою $R_M C_M$, параметри якої визначають теплові процеси фазового переходу в досліджуваній речовині; ключем SW, який визначає граничні умови такого переходу; ланкою $R_{P1}R_{P2}C_P$, параметри якої визначають теплообмін досліджуваної речовини з навколишнім середовищем.

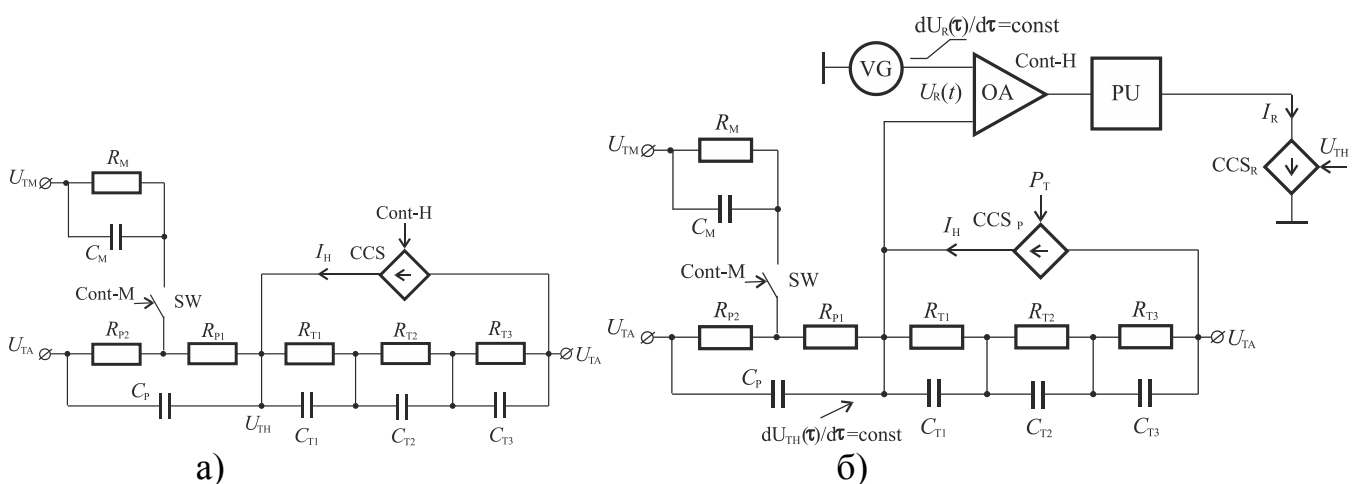


Рис. 7. Спрощений (а) та розвинений (б) варіанти SPICE моделі

Приклад більш розвиненої моделі наведено на рис. 7.б. Температурний режим роботи сенсора термічного аналізу, зокрема швидкість наростання температури, задається програмованим джерелом напруги VG при фіксованій швидкості

наростання температури $dU_R(\tau) = \text{const}$. Вузол керування реалізовано на операційному підсилювачі ОА та силовому каскаді РУ, який формує струм нагріву структури сенсора CCS_R .

Приклади результатів модельних досліджень перехідних характеристик з програмованою швидкістю нагріву наведено на рис. 8.а, 8.б. Можна бачити, що в ході нагріву при досягненні температури фазового переходу досліджуваної речовини спостерігається пікове зростання струму I . Після завершення такого переходу швидкість наростання струму повертається до попереднього значення. Криві 1, 2, 3 представляють варіанти з різними параметрами досліджуваної речовини, зокрема, теплою плавлення. Другий приклад представляє модельні дослідження сенсора в режимі імпульсної модуляції теплового потоку чи температури. Зокрема, такий режим реалізується в методиці ДСК з модуляцією температури чи покроковим скануванням. Отримані результати (рис. 8.в) демонструють перехідні процеси при імпульсному нагріві та інтенсивному відводі теплової потужності в околі точки фазового переходу.

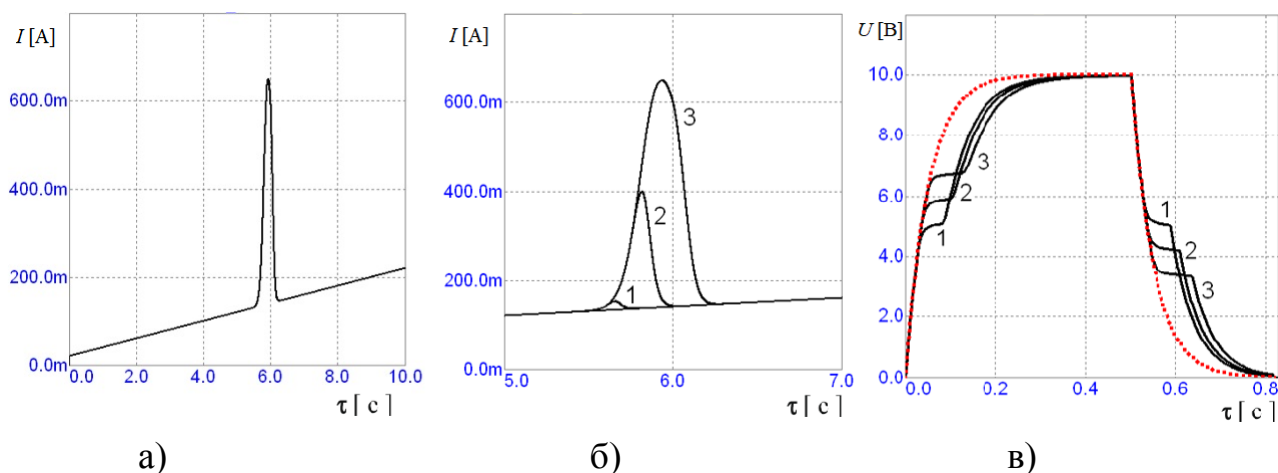


Рис. 8. Приклади перехідних характеристик з програмованою швидкістю нагріву та імпульсною модуляцією теплового потоку

Запропоновано підходи щодо універсалізації електротеплових SPICE моделей сенсорів термічного аналізу. Універсальність моделювання забезпечується новим уніфікованим функціональним SPICE компонентом, який умовно названо Thermicar (термікап) (рис. 9). Цей термін синтезовано з перших частин двох слів – Thermic (термічний) та Capacitor (конденсатор).

Компонент Thermicar містить чотири ключі S1, S2, S3, S4, два джерела напруги VTM, VDT та CM, RDT ланку накопичення енергії фазового переходу. Модель Thermicar реалізує логічну функцію у відповідності до мнемокоду: $F_T = 1$ if $\{V_{TH} > V_{TM} \& V_{CM} < V_{TM} + V_{DT}\}$ OR $\{V_{CM} > V_{TM} \& V_{TH} < V_{TM} + V_{DT}\}$ else $F_T = 0$, де if та else – умова «якщо ... то, інакше ...»; &- логічна операція І; OR- логічна операція АБО; V_{TH} – вхідна напруга (еквівалент температури активної ділянки первинного перетворювача сенсора термічного аналізу); V_{TM} – напруга джерела VTM, яке задає поріг перемикання (еквівалент температури фазового переходу); V_{CM} – напруга на конденсаторі CM, який задає величину накопиченої енергії (еквівалент енергії фазового переходу); V_{DT} – напруга джерела VDT, яке задає гістерезис перемикання. При $F_T = 0$ фазовий перехід відсутній, а при $F_T = 1$ – присутній. 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.

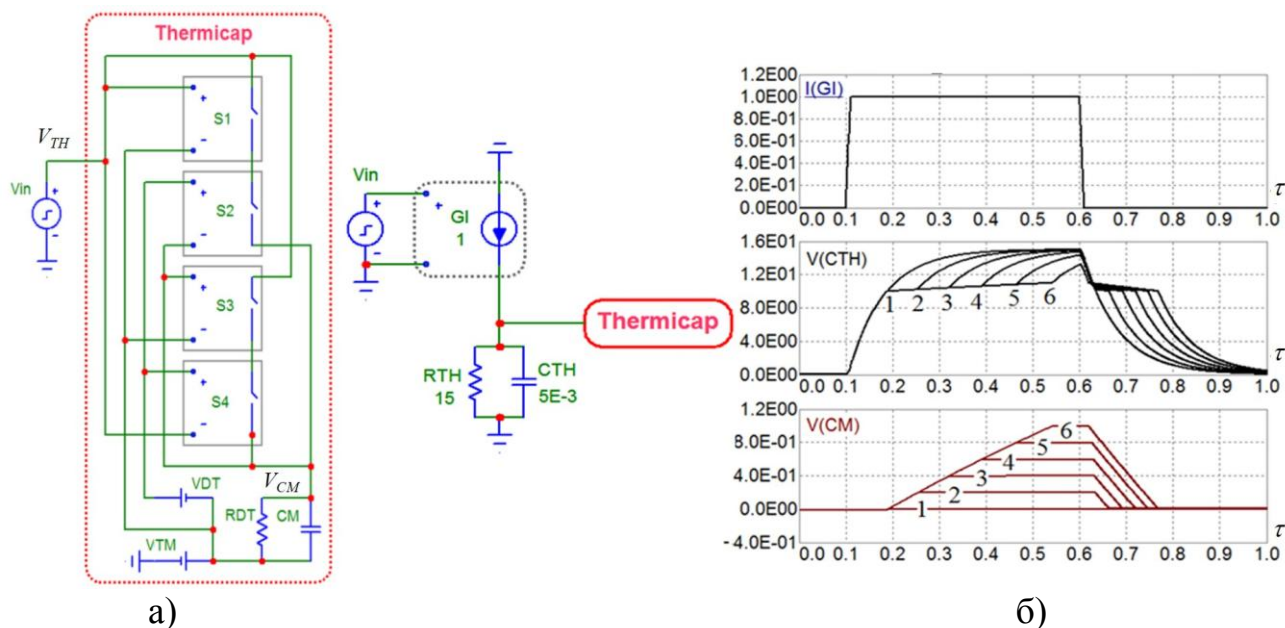


Рис. 9. Схема заміщення Thermicap (а) та результати її Transient аналізу (б) при $V_{DT} = 0$ (1); 0,2 (2); 0,4 (3); 0,6 (4); 0,8 (5); 1,0 В (6)

У п'ятому розділі проведено дослідження та оптимізацію режимів роботи сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах. Розглянуто вимірювальні перетворювачі різницевої температури на елементарних транзисторних каскадах, транзисторних каскадах диференційного типу та диференційного каскаду з температурнозалежним джерелом струму. Встановлено характерні закономірності температурних характеристик, що уможливають проведення оптимізації режиму роботи сенсора різницевої температури. Показано, що нелінійність функції перетворення сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах залежить від таких параметрів транзисторів, як коефіцієнт підсилення струму, опір областей інтегральної структури, напруги Ерлі тощо.

Запропоновано критерії оцінки точності функціонування сенсора різницевої температури на диференційних каскадах, що забезпечують мінімальні значення похибок лінійної апроксимації. Аналізуються абсолютні похибки лінійної апроксимації $Error(dt)_t [^{\circ}C]$ функції вимірювального перетворення в заданому діапазоні різницевих температур dt , які визначаються для трьох значень абсолютної температури:

$$\blacksquare Error(dt)_{t_{NOM}} [^{\circ}C] = \frac{(I_{C1} - I_{C2})_{t_{NOM} + dt}}{S_{NOM}} - (t_{NOM} + dt) - \text{похибка апроксимації для}$$

номінальної температури t_{NOM} , при якій проводився розрахунок крутизни функції перетворення S_{NOM} (в даному випадку значення цієї температури прийнято рівним середині діапазону вимірювання температур; умовно прийнято $t_{NOM} = 50^{\circ}C$);

▪ $Error(dt)_{t_{MIN}} [^{\circ}C] = \frac{(I_{C1} - I_{C2})_{t_{MIN}+dt}}{S_{NOM}} - (t_{MIN} + dt)$ – похибка апроксимації для мінімальної температури t_{MIN} (умовно прийнято $t_{MIN} = 0^{\circ}C$);

▪ $Error(dt)_{t_{MAX}} [^{\circ}C] = \frac{(I_{C1} - I_{C2})_{t_{MAX}+dt}}{S_{NOM}} - (t_{MAX} + dt)$ – похибка апроксимації для максимальної температури t_{MAX} (умовно прийнято $t_{MAX} = 100^{\circ}C$).

Крутизна S_{NOM} розраховувалася за формулою:

$$S_{NOM} \left[\frac{мкА}{^{\circ}C} \right] = \frac{(I_{C1} - I_{C2})_{t_{NOM}+dt_M} - (I_{C1} - I_{C2})_{t_{NOM}-dt_M}}{2dt_M}, \quad (7)$$

де dt_M – модуль максимального значення різницевої температури $dt = -dt_M \dots dt_M$ (умовно прийнято $dt_M = 5^{\circ}C$).

Результати розрахунку точності вимірювального перетворення за критерієм абсолютних похибок лінійної апроксимації $Error(dt)_t [^{\circ}C]$ (рис.10) 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.

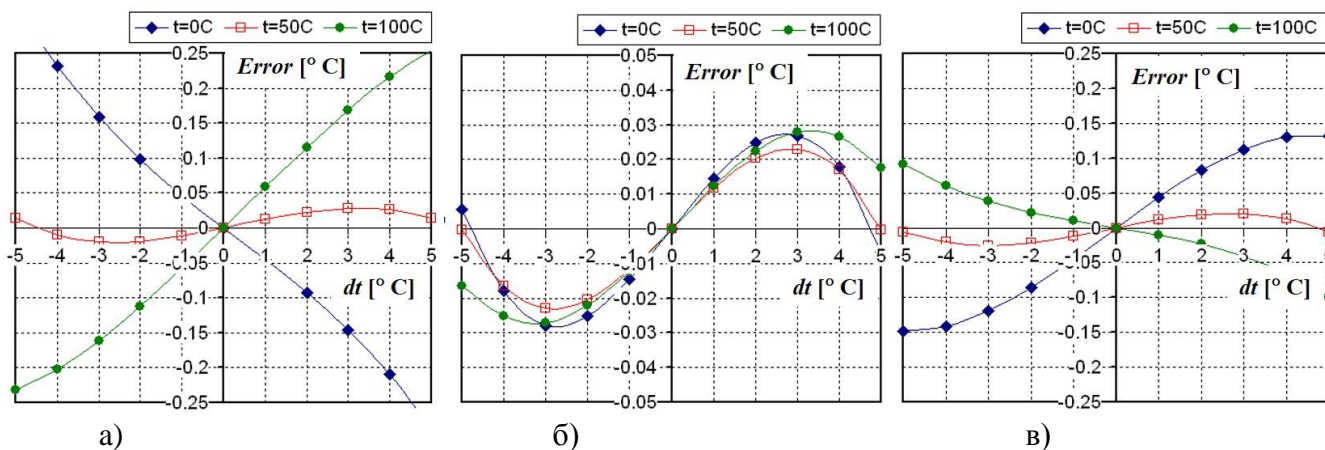


Рис. 10. Залежність похибки апроксимації для $U_{REF} = 1,0$ В (а), $U_{REF} = 1,22$ В (б) та $U_{REF} = 1,4$ В (в)

Запропонований метод оптимізації режиму роботи сенсора різницевої температури передбачає розрахунок сімейств залежностей абсолютної похибки вимірювання різницевої температури при зміні в певному діапазоні параметрів елементної бази, режимів роботи та температури. Зокрема, таке сімейство похибок для номінальної температури представлено на рис. 11.а, а для верхнього діапазону вимірювання температури – на рис. 11.б. Можна бачити, що для наперед заданих параметрів транзисторів при номінальній температурі $50^{\circ}C$ залежності абсолютних значень похибок (рис. 11.а) практично не змінюються при зміні опорної напруги

U_{REF} в діапазоні від 1,2 В до 1,3 В. Максимальне значення абсолютної похибки в заданих умовах не перевищує $0,023^{\circ}\text{C}$. Однак, ці ж залежності при температурі 100°C (рис. 7.б) характеризуються значною модуляцією опорної напруги U_{REF} , а відтак, дозволяють оптимізувати режими роботи сенсора. В даному прикладі діапазон абсолютних значень похибок зростає до $0,04^{\circ}\text{C}$, а оптимальні значення опорної напруги, при якому значення похибки апроксимації не перевищує $0,015^{\circ}\text{C}$ знаходяться в діапазоні від 1,25 В до 1,26 В.

На заключній стадії оптимізації розраховують сімейства залежностей похибки апроксимації у всьому діапазоні вимірювань сенсора різницевої температури. Приклад таких розрахунків наведено на рис. 11.в.

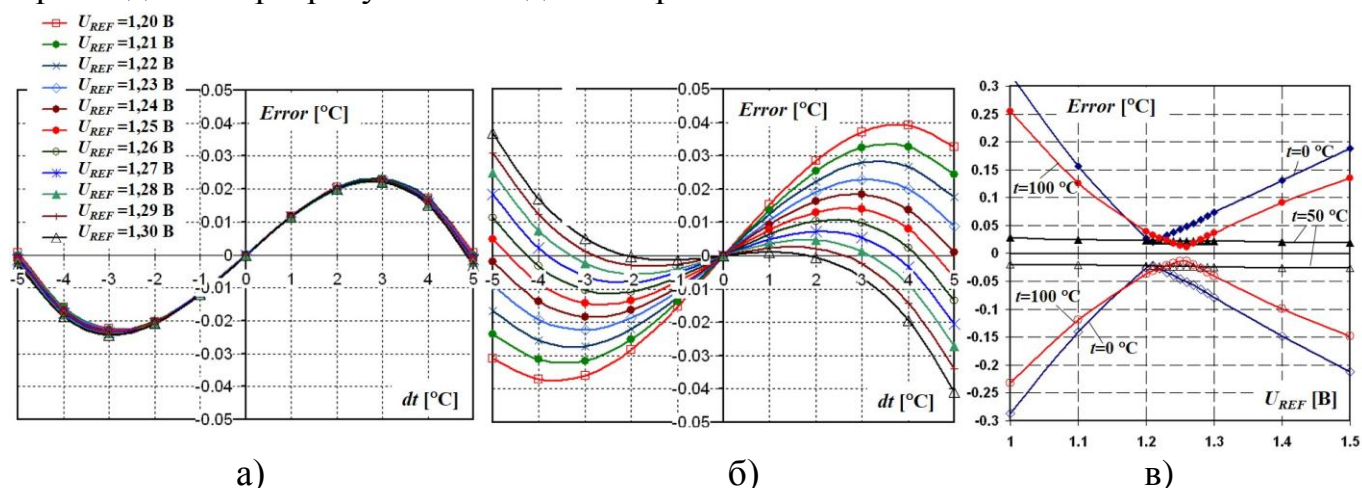


Рис. 11. Сімейства залежностей похибки апроксимації при температурі 50°C (а), 100°C (б) та для різних температур (в)

У шостому розділі наведено результати дослідження властивостей рідкокристалічних і світловипромінювальних органічних структур та конструктивні особливості побудови сенсорів температури на їх основі.

Показано, що одним з перспективних матеріалів для створення сенсорів температури є рідкі кристали, які характеризуються високою стабільністю роботи в умовах високого рівня електромагнітних завад. Для реалізації сенсорів були обрані рідкокристалічні матеріали зі спіральною надмолекулярною структурою (так звані холестеричні рідкі кристали (ХРК)), в яких довжина хвилі використовується як інформаційний сигнал. Безпосередній вплив на спектральні характеристики оптичного випромінювання забезпечується ефектом селективного відбивання світла в ХРК. При цьому ХРК повинен знаходитись в рідкокристалічному агрегатному стані. Однак це створює технологічні труднощі виготовлення первинного перетворювача, тому ХРК необхідно розмістити в твердій оболонці. У роботі вперше показано можливість створення первинного перетворювача сенсора температури на основі полімердиспергованого рідкого кристалу (ПДРК), що дозволило вирішити питання агрегатного стану РК. При освітленні ПДРК білим світлом внаслідок ефекту селективного відбивання в напрямку детектора довжини хвилі поширюється випромінювання, спектральні характеристики якого безпосередньо пов'язані з кроком холестеричної спіралі, який в свою чергу пов'язаний з температурою оточуючого середовища.

Було проведено моделювання теплових процесів та оптичних властивостей таких структур. Модель ПДРК було сформовано у вигляді циліндра діаметром 200 мкм та висотою 400 мкм (рис. 12). Основним матеріалом циліндра є фотополімерна матриця, в середині якої розташовані сфери з ХРК. Результати моделювання теплових процесів показали, що незважаючи на значні відмінності теплопровідності та теплоємності окремих компонентів ПДРК, максимальне значення градієнта температури не перевищує $0,01^{\circ}\text{C}$.

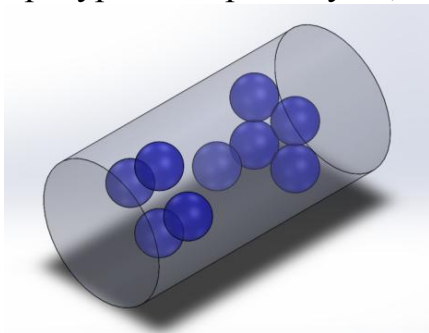
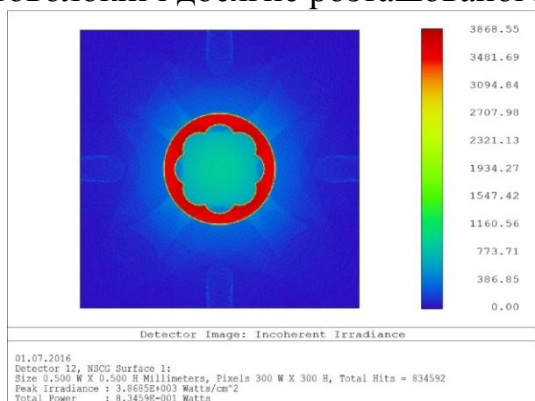


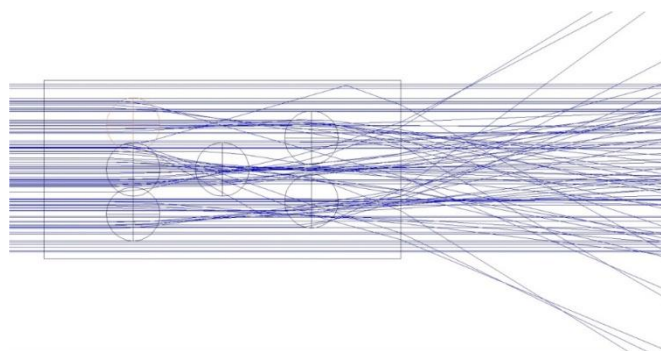
Рис. 12. 3-D модель ПДРК

Динаміка зміни температури модельного зразка показала, що термодинамічна рівновага настає протягом 0,2 с при швидкості наростання температури $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$, що забезпечено малими (до 100 мкм) геометричними розмірами перетворювача. Таким чином з врахуванням інших стадій процесу детектування можна стверджувати, що постійна часу вимірювання пристрою становитиме не більше 0,3с.

Моделювання проходження світла в таких структурах було проведено за допомогою програмного продукту ZEMAX (рис. 13). Співвідношення між корисним та паразитним випромінюванням, яке проходить крізь первинний перетворювач визначається в основному співвідношенням площ однорідної полімерної ділянки та ділянки з вкрапленнями РК в поперечному перерізі первинного перетворювача. Аналіз полімердиспергованої структури показав, що величину паразитного випромінювання можна знизити до 3-5 % шляхом збільшення кількості вкраплень рідкого кристалу. Однак для полімердиспергованих структур характерним є високий ступінь розсіювання, що обмежує відстань між оптичноактивним елементом сенсора та детектором або вимагає використання світловодів як оптичних трактів. Проведений аналіз показав, що запропонований первинний перетворювач доцільно використовувати як елемент вбудований в оптоволокно. У цьому випадку випромінювання, яке зазнало відхилення на оптичних неоднорідностях, внаслідок явища повного внутрішнього відбивання продовжить розповсюдження в оптоволокні і досягне розташованого на значній відстані детектора.



а)



б)

Рис. 13. Розподіл інтенсивності на виході з ПДРК (а) і хід променів в моделі ПДРК та ділянці, що безпосередньо прилягають до нього (значення показників заломлення полімерного циліндру та РК становлять 1,43 та 1,55, відповідно)

Первинні перетворювачі на основі ПДРК були отримані експериментально. В ролі полімерної матриці були використані матеріали NOA60 та фотополімерний матеріал "Фомат ФВ-72" з довжиною хвилі полімеризації 340 нм. Як ХРК був використаний РК РТІ «П», його суміш з нематичним РК 5ЦБ та матеріали серії КЕТ. Проведені дослідження показали, що в ХРК, введеному в полімерну матрицю, спостерігається явище селективного відбивання світла, однак для ПДРК максимум довжини хвилі зміщується в короткохвильову область.

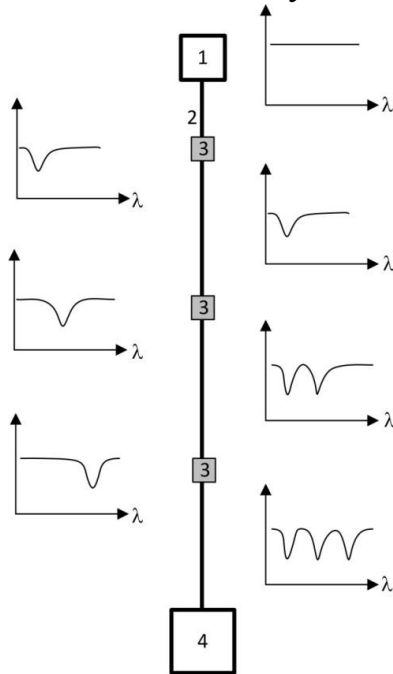


Рис.14. Трансформація спектральної характеристики оптичного сигналу при послідовному проходженні первинних перетворювачів зі зміщеними ділянками селективного відбивання

Розроблено конструктивне рішення функціонально-інтегрованого сенсора температури на основі органічних світловипромінювальних та фоточутливих матеріалів, що в одній структурі об'єднує джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання.

Велика ширина спектральних ліній випромінювання та поглинання світловипромінювальних та фоточутливих елементів на основі органічних напівпровідникових матеріалів дозволяє реалізувати сенсор температури у вигляді системи, зображеної на рис. 15. Можливість отримання органічних фоточутливих структур з аномально широкою смугою поглинання (весь видимий діапазон) дозволяє використати в ній однакові фоточутливі елементи чи один фотоелемент (фотоструктуру) для всієї структури.

Спектральні характеристики таких структур мають високу температурну чутливість, яка в основному визначаються параметрами рідкокристалічного матеріалу і може досягати 30 нм/°С.

Застосування довжини хвилі як параметра детектування температури дозволяє розташувати на одному оптичному волокні декілька первинних перетворювачів при умові зміщення їх оптичних характеристик (рис.14). Це дозволяє проводити як вимірювання параметра в декількох точках, рознесених між собою в просторі, так і вимірювання різних параметрів в одній точці з використанням одного оптоволоконного тракту та детектора.

Справа на рис.14 зображено власні спектральні характеристики первинних перетворювачів, а зліва – зміна результуючої спектральної характеристики на шляху від джерела до детектора. Використання фотополімерів для створення первинних перетворювачів дозволяє проводити їх монтаж безпосередньо на місці експлуатації без застосування додаткових конекторів.

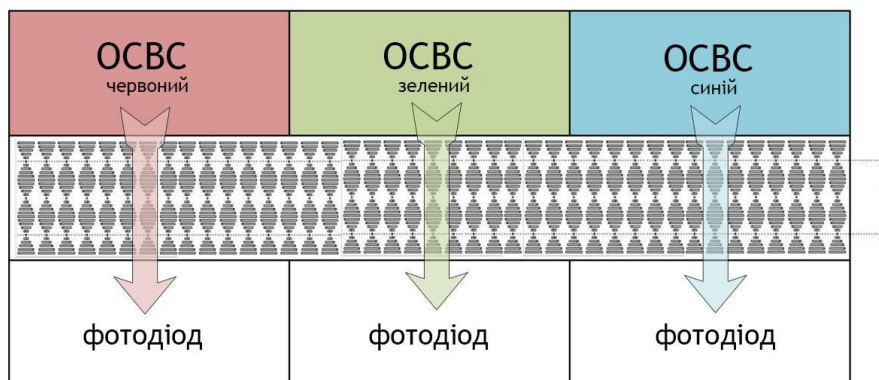


Рис. 15. Принципова схема сенсора температури на основі структури ОСВС – ХРК – фотодіод

Однією з причин значного комерційного потенціалу органічних матеріалів та структур є простота та не висока вартість їх виготовлення, а також можливість варіювання їх фізичних властивостей за допомогою підбору як методів хімічного синтезу, так і технології формування активних складових. Створення світловипромінювальних структур на основі органічних матеріалів дає можливість значно зменшити їхню енергозатратність та уможливує створення гнучких джерел світла будь-яких розмірів на відносно екологічно чистих матеріалах.

Були використані органічні світловипромінювальні структури, сформовані на основі фосфоресцентних матеріалів $\text{Ir}(\text{ppy})_3$, $\text{Ir}(\text{pic})$, $\text{Ir}(\text{acac})$, структури $\text{ITO}/\text{NPD}/\text{CBP}:\text{Ir complex}/\text{VSP}/\text{TPVi}$. Спектри електролюмінесценції утворених структур є ідентичними спектрам електролюмінесценції або фотолюмінесценції іридієвих комплексів (рис.16). Максимуми електролюмінесценції досліджуваних структур становлять 450 нм, 530 нм, 610 нм, відповідно, для кожної структури системи RGB (червоний-зелений-синій).

Формування наведених органічних структур забезпечує можливість реалізації інтегрованої структури будь-яких розмірів та форм без використання додаткових джерел світла чи їх великої кількості у структурі. Для фосфоресцентних ОСВС характерна емісія у видимій області з колірними характеристиками RGB (R – червоний, G – зелений, B – синій) стандарту, висока якість свічення та стабільна струмова і квантова ефективність на всьому діапазоні густини струму та робочих напруг пристрою.

В ролі фоточутливого елемента, проводилися дослідження гібридної гетероструктури p-InSe-BODIPY з метою її використання як фотоприймача широкого спектру чутливості (рис.17).

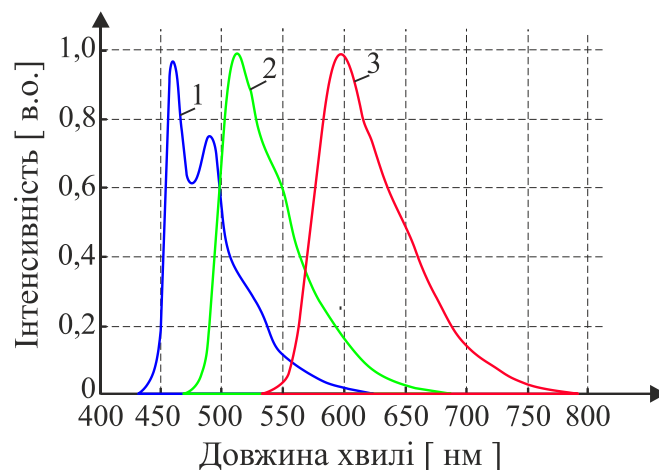


Рис. 16 Спектри електролюмінесценції сформованих структур з емісійними шарами: $\text{Ir}(\text{pic})$ (1 -синій), $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ (2-зелений), $\text{Ir}(\text{acac})$ (3- червоний)

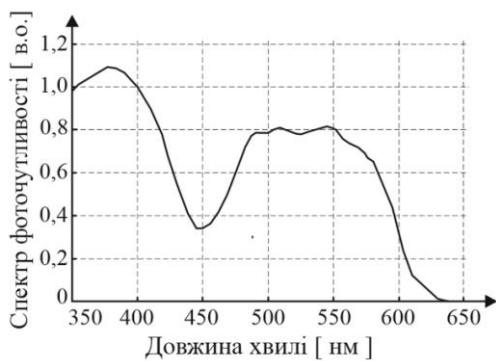


Рис. 17. Спектр fotocутливості гетеропереходу Bodipy-InSe у фотовольтаїчному режимі

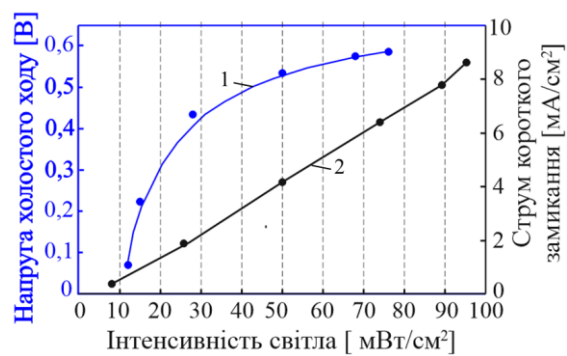


Рис. 18. Залежність напруги холостого ходу (1) та густини струму короткого замикання (2) від інтенсивності світла для гетероструктури Bodipy-InSe:Ag

Із залежності струму короткого замикання від освітленості зразка білим світлом (рис. 18) встановлено, що для гетероструктури Bodipy-InSe:Ag динамічний діапазон лінійності структури становить не менше ніж $7 - 90 \text{ мВт/м}^2$ (14 дБ). У фотовольтаїчному режимі струмова fotocутливість до фотопотоку становить $0,1 \text{ мА/мВт}$.

Дана гетероструктура характеризується спектром fotocутливості у всій видимій зоні за рахунок використання додаткового органічного шару BODIPY, що дозволяє використовувати її для інтегрованої оптичної системи як fotocутливого елемента вищевказаної RGB системи та джерела випромінювання у видимій і ближній ультрафіолетовій області спектру.

У **сьомому розділі** представлено приклади апаратно програмної реалізації мікроелектронних сенсорів термічного аналізу – сигнального перетворювача функціонально-інтегрованих термомагнітних сенсорів, сенсора різницевої температури з функцією інтегрування та сигнального перетворювача сенсорів термічного аналізу на основі поєднання термічних та ємнісних методів досліджень.

Функціонально-інтегрований термомагнітний сенсор реалізовано на латеральному магнітотранзисторі з розщепленим колектором (рис. 19), що дозволило поєднати в єдиній інтегральній структурі три функції – вимірювання магнітного поля, керований нагрів і вимірювання температури, а також забезпечило подальшу мініатюризацію сенсора.

Запропоновано схемне рішення щодо переходу в магнітотранзисторних сенсорах від двополярних сигналів до ефективнішого однополярного вихідного сигналу. Таке рішення особливо важливе в пристроях з низьковольтним однополярним живленням та забезпечує високу енергоефективність сучасних сенсорних пристроїв, зокрема Інтернету Речей. Відтак, в даній схемі стабілізується не базовий, емітерний чи сумарний колекторний струми магнітотранзистора, а лише струм одного з колекторів (в даному випадку – струм колекторного виводу 5). Вказаний колектор формує опорне коло, а обумовлене струмом цього колектора падіння напруги на резисторі R_5 використовується як опорна напруга U_1 . Натомість другий колектор (вивід 4) формує коло інформативного сигналу з напругою U_2 .

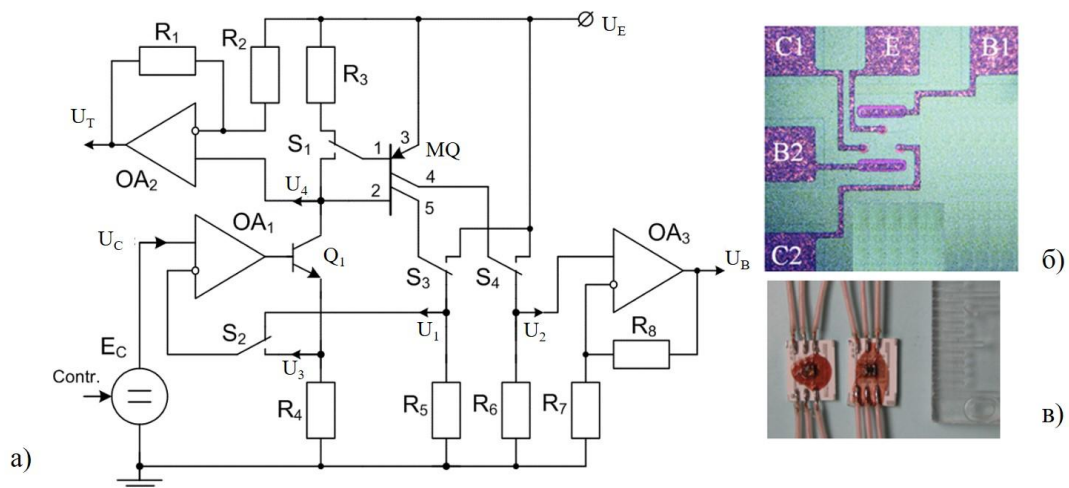


Рис. 19. Спрощена схема аналогового фронт-енду термомагнітного сенсора (а), фотографія магнітотранзистора (б) та зонди на його основі (в)

Реалізація сигнального перетворювача здійснена на базі модуля CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit (рис. 20). Фотографію плати макету сигнального перетворювача функціонально інтегрованого термомагнітного сенсора та вікна програмного забезпечення керування процесом вимірювання та візуалізації результатів вимірювання наведено на рис. 20.

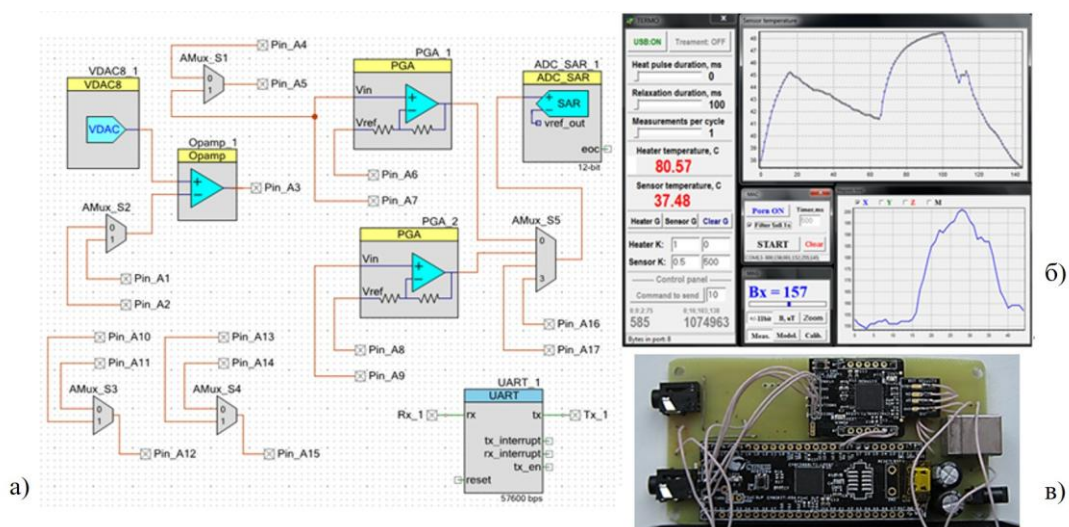


Рис. 20. Реалізація схеми сигнального перетворювача на PSoC (а), вікна програмного забезпечення (б) та плата макету (в)

Показано, що в ряді задач сучасної сенсорики, зокрема в мікро- та нанокалориметрах, необхідним є поєднання високої роздільної здатності вимірювання різницевої температури та швидкодії процесу вимірювання. Однак зростання швидкодії призводить до невідворотної втрати точності вимірювання. Запропоновано рішення, що базується на сигнальному перетворювачі різницевої температури з функцією аналогового високоточного швидкодіючого інтегрування різниці температур $\int \Delta T dt$ в певному часовому інтервалі.

У запропонованому базовому варіанті схеми аналогового інтегратора (рис. 21.а), враховуючи високий імпеданс вихідних кіл перетворювача різницевої температури, сигнальне перетворення вхідних напруг U_1 та U_2 інтегратора

відбувається в потенціальних колах неінвертуючих входів операційних підсилювачів OA_1 , OA_2 . Причому, OA_1 виконує функцію повторювача напруги U_2 , а OA_2 – аналогового інтегратора. Вхідний струм $I_{IN} = (U_2 - U_1) / R_{IN}$ останнього визначається опором резистора R_{IN} та різницею напруг $U_2 - U_1$. Інтегрування цього струму здійснюється на конденсаторі C_{IN} кола від'ємного зворотного зв'язку OA_2 . Вихідна напруга U_{OUT} схеми визначається виразом

$$U_{OUT} = U_1 + \frac{1}{R_{IN} C_{IN}} \int_{t_1}^{t_2} (U_2 - U_1) dt. \quad (8)$$

Модифікований варіант схеми інтегратора (рис. 21. б) містить диференціальний підсилювач різниці вхідних напруг. При $R_2 = R_3 = R_{23}$ вихідна напруга дорівнює

$$U_{OUT} = U_{1A} + \frac{K_A + 1}{R_{IN} C_{IN}} \int_{t_1}^{t_2} (U_2 - U_1) dt, \text{ де } K_A = R_{23} / R_1 - \text{коефіцієнт підсилення.}$$

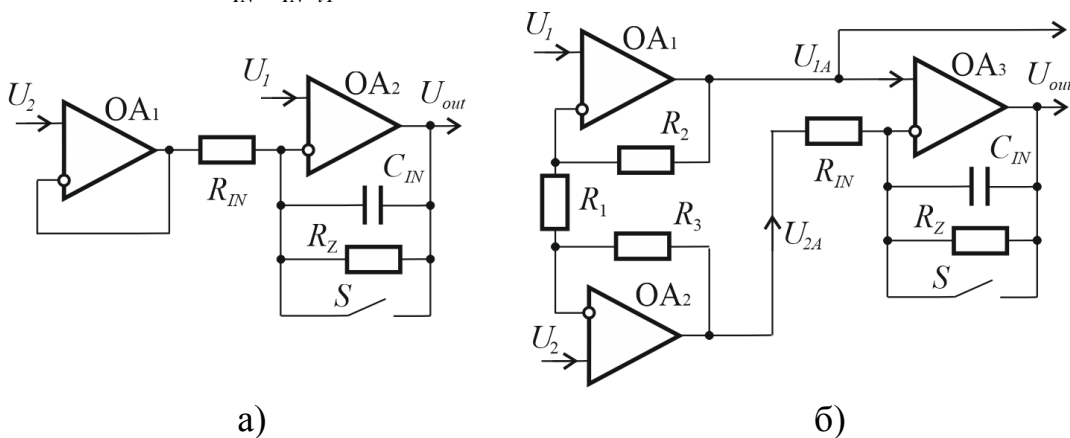


Рис. 21. Базовий (а) та модифікований (б) варіанти схеми інтегратора

Подальше сигнальне перетворення передбачає різницеве аналого-цифрове перетворення вихідної напруги U_{OUT} відносно опорної напруги U_1 для базового чи U_{1A} для модифікованого варіантів інтегратора. Тому, очевидною перевагою модифікованого варіанту, крім підсилення різниці вхідних напруг, є низький імпеданс кола формування напруги, що покращує співвідношення сигнал-шум.

Розроблено дослідний зразок сенсора різницевої температури (рис. 22), що містить: СРТ – вузол сигнального перетворювача різницевої температури, Ін – вузол інтегратора, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, МК – мікроконтролер, ПК – персональний комп'ютер.

Для дослідження ефективності використання запропонованого інтегратора проводилися експерименти по вимірюванню значень інтегралів функції напруги $U(t)$ в колі, яке імітує імпульси різницевої температури $\Delta T(t)$. Форма імпульсів вибиралася з точки зору характерної залежності температури досліджуваного об'єкту в процесі його імпульсного нагріву та теплової релаксації. Характерні приклади результатів таких вимірювань наведено на рис. 23. У першому прикладі амплітуда імпульсів напруг від'ємної полярності на інтегруючій RC ланці становила приблизно $\Delta U \approx -10$ мВ, тривалість імпульсів нагріву – $\tau_p = 25$ мс. Результатами вимірювань є часова залежність напруги $\Delta U(\tau)$ (рис. 23, а) та її інтеграл, яким є відповідне значення напруги U_{INT} на виході інтегратора (рис. 23, б). Можна бачити, що характер отриманих результатів вимірювання напруг $\Delta U(\tau)$ та кількість

вимірних значень $N = 51$ є достатніми для подальшого високоточного розрахунку площі імпульсу методом цифрового (M1) та аналогового (M2) інтегрування. За серією з 30-ти масивів вхідної $\Delta U(\tau)$ та вихідної U_{INT} напруг було встановлено, що похибки визначення інтегралу в обох методах M_1 та M_2 є незначними і не перешують 0,1 %, відповідно.

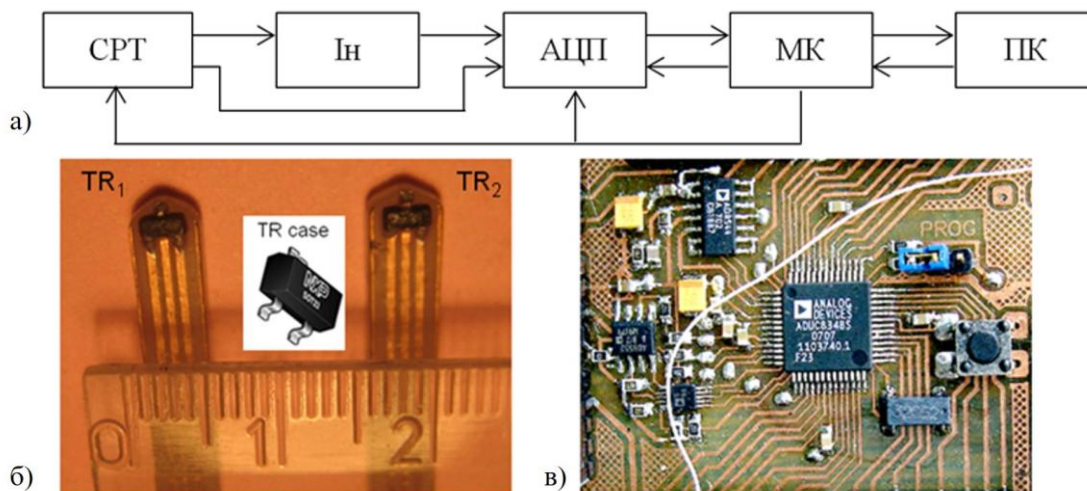


Рис. 22 Блок-схема сенсора різницевої температури, фотографія зондів та плати сигнального перетворювача сенсора

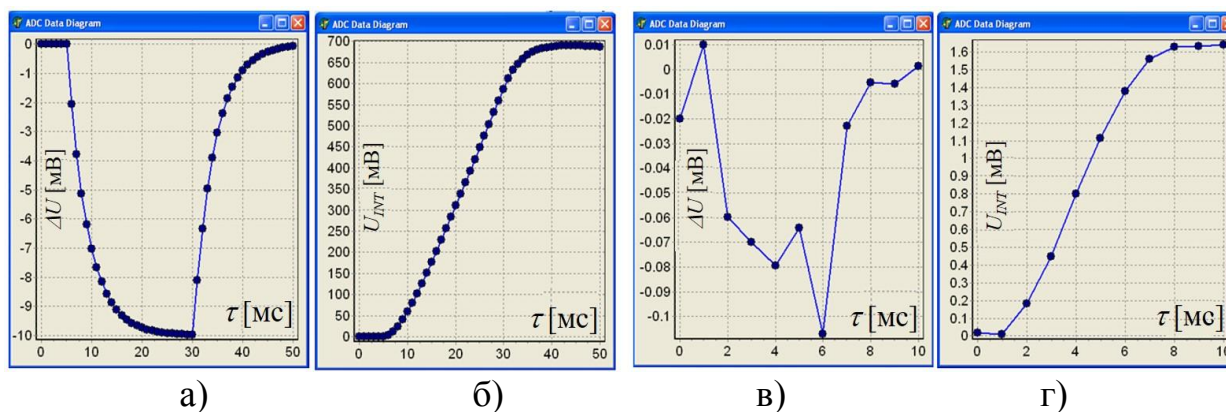


Рис. 23. Результати вимірювань вхідної та вихідної напруг інтегратора

При зменшенні рівня вхідної напруги спостерігається суттєве погіршення точності вимірювання різницевої напруги (рис. 23, в, г). При цьому: $\Delta U \approx -0,1$ мВ, $\tau_p = 5$ мс. Значний рівень шуму (приблизно 10 мкВ) та мала кількість вимірних значень вхідної напруги ($N = 11$) обумовлюють суттєву похибку першого методу – приблизно $\delta(M_1) \approx 20$ %. Натомість, похибка другого методу не перевищує $\delta(M_2) < 1$ %.

Результати експериментальних досліджень пристрою показали високу точність вимірювання різницевої напруги $\pm(1 \dots 10)$ мкВ (в залежності від діапазону аналого-цифрового перетворення), що відповідає роздільній здатності вимірювання різницевої температури $\pm(10^{-4} - 10^{-3})$ °С.

У дисертації запропоновано підходи до побудови функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на основі транзисторних структур та сигнальних перетворювачів ємнісного типу. За основу сигнального перетворювача ємнісного

типу взято високопрецизійний 24-бітний конвертер AD7747 компанії Analog Devices. Сигнальний перетворювач містить аналоговий вузол керування функціонально-інтегрованим сенсором на транзисторній структурі, ємнісний контролер на конвертері AD7747 та вузол керування з використанням мікроконтролера Atmega 328 на платформі уніфікованого модуля Arduino Nano (рис.24).

Транзистор Q_1 виконує дві функції – керуваного нагріву ємнісного модуля CAP module та вимірювання його температури. Сигнальне коло на операційному підсилювачі OA_1 забезпечує керування струмом вказаного транзистора T_1 . Керування здійснюється модуляцією амплітуди чи тривалості імпульсів

Розроблений функціонально-інтегрований сенсор забезпечує керований нагрів об'єктів дослідження і дозволяє проводити вимірювання різницевої температури з роздільною здатністю $0,001^\circ\text{C}$, а механічних зміщень і деформацій - $1 - 10$ мкм.

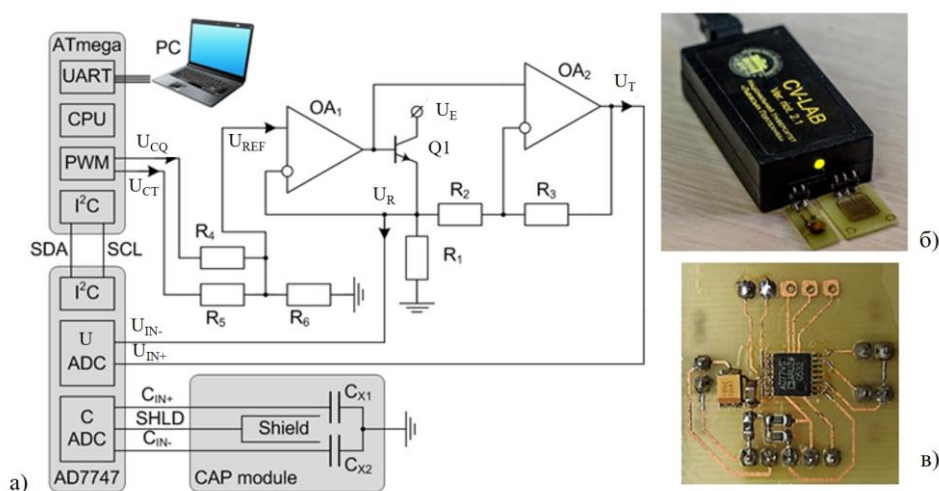


Рис. 24. Функціональна схема та дослідний зразок функціонально-інтегрованого сенсора на основі поєднання термічних та ємнісних методів досліджень

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень, спрямованих на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми розроблення та оптимізації режимів роботи функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу, отримано наукові та практичні результати:

1. Розроблено методи та засоби оптимізації структурно-схемних рішень сигнальних перетворювачів терморезистивних і термоелектричних сенсорів, які дозволили зменшити похибку нелінійності функції перетворення ($0,01\%$ в діапазоні $0 - 800^\circ\text{C}$) та час вимірювання температури (менше $0,5 \tau_0$ (τ_0 - постійна часу терморезистора)), забезпечили компенсацію впливу опорів ліній зв'язку. Розроблено нові структури двошарових плівкових терморезистивних мостових схем, які забезпечили вимірювання абсолютної та різницевої температури з роздільною здатністю $2,5 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$ в діапазоні $-10 - 100^\circ\text{C}$. Вдосконалено методи компенсації впливу вільних кінців термопар шляхом формування додаткової змінної складової напруги живлення мостових схем, що дозволило зменшити похибку від впливу вільних кінців до $0,05^\circ\text{C}$ в діапазоні $-10 - 60^\circ\text{C}$.

2. Розроблено нову концепцію функціонального інтегрування структур твердотільної електроніки в мікроелектронних сенсорах термічного аналізу. Новизною цієї концепції є використання єдиної мікроелектронної структури, зокрема біполярних транзисторних структур, 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. Показано, що ефективна реалізація функціонально інтегрованих сенсорів термічного аналізу передбачає використання імпульсних циклічних режимів керування транзисторними структурами.

3. Проведено аналіз режимів роботи двофункціональних транзисторних перетворювачів, які забезпечують керований нагрів та вимірювання температури. В таких перетворювачах нагрів здійснюється керованою тепловою потужністю, що розсіюється на транзисторі, а вимірювання температури – відповідним вимірюванням одного з температурозалежних параметрів. Запропоновано принципи функціонування та проведено параметричний аналіз кіл керування двофункціональних транзисторних перетворювачів. Основою запропонованих рішень є джерела струму та кола зворотного зв'язку, за допомогою яких формують незалежне керування напругою та струмом кола транзистора.

4. Встановлені закономірності розподілу струму в напівпровідникових структурах мультифункціональних транзисторних перетворювачів, які забезпечують керований самонагрів та вимірювання температури, зокрема в мікропотужних інтегральних транзисторах та потужних транзисторах зі зустрічно-смуговою топологією, транзисторних матрицях, спарених транзисторах Дарлінгтона та інтегральних рішеннях типу «біполярний транзистор з ізольованим затвором». Показано, що при збільшенні струму понад 10мА має місце його значний перерозподіл, що обумовлює виникнення градієнту температури та зменшення температурної чутливості. На основі аналізу температурних залежностей складених транзисторних структур показано, що при використанні спарених транзисторів Дарлінгтона значення температурного коефіцієнту має значення дорівнює $-3,3 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$, а при використанні спарених транзисторів типу IGBT його значення становить $-3,6 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

5. 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.

6. Розроблено та специфіковано новий функціональний SPICE компонент – Thermicap (термікап – термін, що синтезовано з перших частин двох слів – Thermic (термічний) та Capacitor (конденсатор)). Електрична схема заміщення цього компонента, що базується на термічно керованому колі з комутацією конденсатора, дозволяє проводити комплексне структурно-схемотехнічне моделювання сенсорів термічного аналізу для дослідження ендотермічних та екзотермічних процесів з акумуляцією теплової енергії при фазових переходах речовини та хімічних реакціях.

7. Модельними дослідженнями сенсорів термічного аналізу на основі синтезу теплових годографів Ліссажу, які отримують співставленням амплітудно-фазових характеристик напруги (функціональний аналог температури) та струму (функціональний аналог теплової потужності) встановлено можливість підвищення інформативності, спрощення структурно-схемної реалізації та мінімізації енергоспоживання сенсорів шляхом заміни гармонічних сигналів на імпульсні. Для досягнення максимального ефекту щодо інформативності частота прямокутних імпульсів розігріву повинна бути оптимізована за критерієм максимально можливої модуляції форми, нахилу та «розмиття» годографа фігур Ліссажу. Наявність останнього свідчить про тривалість та інтенсивність процесу теплової релаксації.

8. Проведено дослідження та оптимізацію режимів сенсорів різницевої температури на елементарних транзисторних каскадах, транзисторних каскадах диференційного типу та каскадах з температурнозалежним джерелом струму. Запропонований метод оптимізації режиму роботи сенсора різницевої температури передбачає розрахунок сімейств залежностей абсолютної похибки вимірювання різницевої температури при зміні в певному діапазоні параметрів елементної бази, їх режимів роботи та температури. Показано, що для формування інформативних сигналів різницевої та абсолютної температур високостабільного сенсора температури на диференційному каскаді із стабілізуючим джерелом струму, останні реалізують на вузлі струмового дзеркала, причому визначальний вплив на температурний коефіцієнт функції перетворення сенсора має напруга живлення вхідного кола струмового дзеркала. Встановлено, що при зменшенні напруги джерел живлення та опорної напруги температурозалежного джерела струму нормована крутизна струму нелінійно зростає. Так, зменшення напруги живлення з 4 В до 2 В обумовлює приблизно двократне зростання нормованої крутизни, а при зменшенні напруги з 2 В до 1 В нормована крутизна зростає більше ніж в 3 рази (нормована крутизна становить 0,05% та 0,5% на градус при напрузі живлення 5 та 1 В, відповідно). Оптимальний діапазон напруг живлення становить 1 – 2 В.

9. Визначено критерій оцінки точності функціонування сенсора різницевої температури на диференційному каскаді та метод оптимізації режиму його роботи. Цим критерієм є значення абсолютної похибки лінійної апроксимації $Error(dt)_i [^{\circ}C]$ функції вимірювального перетворення в заданому діапазоні різницевої температур dt . Встановлено, що при номінальній температурі $t_{NOM} = 50^{\circ}C$ похибка лінійної апроксимації не перевищує значення $0,025^{\circ}C$ і практично не залежить від опорної напруги. Натомість при відхиленні абсолютної температури від номінальної похибка лінійної апроксимації зростає і має виражену залежність від опорної напруги. Так, при граничних значеннях абсолютної температури $t_{MIN} = 0^{\circ}C$ та

$t_{MAX} = 100^{\circ}\text{C}$ максимальне значення модуля похибки лінійної апроксимації при $U_{REF} = 1.0\text{ В}$ збільшується до $0,3^{\circ}\text{C}$. При значенні опорної напруги U_{REF} в діапазоні від $1,2\text{ В}$ до $1,3\text{ В}$ похибка лінійної апроксимації не перевищує $0,04^{\circ}\text{C}$ в діапазоні $0 - 100^{\circ}\text{C}$.

10. Запропоновано систему моніторингу температури з рознесенням в просторі точок вимірювання на основі розміщених в одному оптичному каналі рідкокристалічних полімер-диспергованих первинних перетворювачів зі зміщеними температурними залежностями максимумів селективного відбивання. Таке конструктивне рішення можна використати для контролю технологічних процесів, зокрема при виготовленні фармацевтичних препаратів. При цьому забезпечується точність вимірювання до $0,01^{\circ}\text{C}$, а значення постійної часу вимірювання не перевищує $0,3\text{ с}$.

11. Вперше запропоновано конструктивні рішення функціонально-інтегрованого сенсора температури на основі органічних світловипромінювальних та фоточутливих матеріалів, де в одній структурі об'єднано джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання. Спектральні характеристики таких структур показали високу температурну чутливість, яка в основному визначаються параметрами рідкокристалічного матеріалу і може досягати $30\text{нм}/^{\circ}\text{C}$. Джерелом світла слугують органічні світловипромінювальні структури на основі емісійних шарів металоорганічних комплексів $\text{Ir}(\text{pic})$, $\text{Ir}(\text{ppy}_3)$, $\text{Ir}(\text{acac})$, що забезпечують високу струмову та квантову ефективність та реалізацію RGB колірної системи.

12. Розроблено функціонально-інтегрований термомагнітний сенсор на основі інтегральних структур латеральних магнітотранзисторів з розщепленим колектором що поєднує в одній інтегральній структурі три функції – вимірювання магнітного поля, керування нагріву та вимірювання температури. Запропоноване рішення забезпечує подальшу мініатюризацію сенсорів та можливість проводити in-situ вимірювання однокомпонентним функціонально-інтегрованим сенсором. Розроблена схема функціонально-інтегрованого термомагнітного сенсора дозволила перейти від двофазного типу вихідного сигналу магнітотранзистора до ефективнішого однофазного. Таке рішення особливо важливе в пристроях з низьковольтним однополярним живленням, що є вимогою до сучасних сенсорних пристроїв, зокрема Інтернету Речей. Реалізація сигнального перетворювача здійснено на базі модуля CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit.

13. Розроблено сенсор різницевої температури з функцією інтегрування, який виконує функцію аналогового високоточного швидкодіючого інтегрування різниці температур в певному часовому інтервалі. Представлено залежність різниці температур ΔT між досліджуваною та опорною (відомою) речовинами в пристроях термічного аналізу, яка виникає внаслідок фазового переходу досліджуваної речовини, а площа, що обмежується графіком часової залежності ΔT та часовою віссю, є інформативним параметром кількості обумовленої таким переходом теплової енергії. Показано, що суттєве підвищення точності забезпечується заміною інтегрування за дискретними точками $\Delta T(t_i)$ на формування неперервної (аналогової) функції інтегралу різниці температур. Первинні перетворювачі (зонди)

сенсора температури реалізовані на двох мікрокорпусних біполярних транзисторах BC817/BC337 n-p-n типу провідності. Використані високопрецизійні операційні підсилювачі серії AD8551/AD8552/AD8554 та високо прецизійний мікроконвертер ADuC834 (MicroConverter[®], Analog Devices). Експериментальні результати дослідження пристрою показали, що точність вимірювання напруги знаходиться в межах $\pm(1 - 10)$ мкВ, що відповідає роздільній здатності вимірювання температури $\pm(10^{-3} - 10^{-4})$ °С.

14. Розроблено сигнальний перетворювач сенсорів термічного аналізу на основі поєднання термічних та ємнісних методів досліджень, що містить аналоговий вузол керування функціонально-інтегрованим перетворювачем термічного аналізу на транзисторній структурі; ємнісний контролер на 24-бітному ємнісному конвертері AD7747; вузол керування з використанням мікроконтролера Atmega 328. Перетворювач, що забезпечує керований нагрів об'єктів дослідження, характеризується високими значеннями роздільної здатності вимірювання температури (не гірше 0,001°С) та електричної ємності (не гірше 10^{-16} Ф), що забезпечує можливість вимірювання температурної деформації досліджуваного об'єкта з точністю 1 – 10 мкм, в залежності від розмірів чутливих електродів. Пріоритетним використанням розробленого сигнального перетворювача є мікроелектронні сенсори в концепції Інтернету Речей.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Бойко, О. В., Голяка, Р. Л., & Готра, З. Ю. (2018). *Сигнальні перетворювачі функціонально інтегрованих сенсорів теплових величин*. Львів: Простір-М. 292с.

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Бойко, О., Голяка, Р., & Готра З. (2018). Сенсор різницевої температури на основі інтегруючого сигнального перетворювача *Вимірювальна техніка та метрологія*, 79(3), 25-36..

3. Бойко, О. (2017). Вдосконалення двопровідних терморезистивних перетворювачів з комутаційним інвертуванням зразкових струмів. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 78, 42-47.

4. Бойко, О. В. (2017). Підвищення швидкодії терморезистивних перетворювачів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2 (58), 47-52.

5. Баштик, Ю. В., Бойко, О. В., Фечан, А. В., & Чабан, О. В. (2015). Моделювання впливу поверхневих умов та зовнішніх полів на параметр порядку рідких кристалів. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 29(1), 103-108.

6. Бойко, О. В., Матвіїв, Р. О., & Чабан, О. П. (2015). Компенсація впливу опорів ліній зв'язку в двопровідних терморезистивних перетворювачах. *Методи та прилади контролю якості*, 1(34), 83-89.

7. Бойко, О., & Голяка, Р. (2015). Електротеплова SPICE–модель калориметричного перетворювача. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Комп'ютерні науки та інформаційні технології*, (826), 345-353.

8. Готра, З. Ю., Голяка, Р. Л., & Бойко, О. В. (2014). Схема та SPICE модель сенсора температури біомедичного диференційного скануючого калориметра. *Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика, електроніка*, (3, Вип. 1), 30-36.

9. Готра, З., Голяка, Р., Бойко, О., & Вістак, М. (2014). Сенсор різницевої температури біомедичного диференційного сканувального калориметра. *Вимірвальна техніка та метрологія*, 75. 73-78.

10. Готра, З. Ю., Голяка, Р. Л., & Бойко, О. В. (2014). Моделювання характеристики перетворення диференційного сенсора температури на біполярних транзисторах. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроніка*, 798, 23-33.

11. Готра, З. О., Фечан, А. В., Сушинський, О. Є., Барило, Г. І., Бойко, О. В., Вістак, М. В., Чабан, О. В., & Пристай, Т. В. (2013). Полімер-диспергований рідкокристалічний матеріал як активне середовище первинного перетворювача оптичного сенсора температури. *Міжнародний науково-технічний журнал, Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, (2)26, 131-135.

12. Готра, З. Ю., Голяка, Р. Л., Ільканич, В. Ю., Марусенкова, Т. А., & Бойко, О.В. (2013). Повышение электромагнитной помехоустойчивости сигнальных преобразователей на сенсорах Холла. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, (4), 13-18.

13. Бойко, О.В., Чабан, О.П., Матвіїв, Р.О., & Куць, В.Р. (2013). Терморезистивний перетворювач з аналоговою лінеаризацією. *Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, (1), 57-62.

14. Микитюк, З. М., Фечан, А. В., Сушинський, О. Є., Барило, Г. І., Бойко, О. В., Іванюк, Х. Б., & Турик, П. М. (2012). Температурний сенсор на основі селективного відбивання в рідких кристалах. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 24(2), 147-151.

15. Готра, З. Ю., Голяка, Р. Л., Ільканич, В. Ю., Годинюк, І. М., & Бойко, О. В. (2012). Високостабільний гальваномагнітний сенсор з часовим перетворенням на комутованих конденсаторах. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 6(12), 7-11.

16. Бойко, О., Готра, З., Готра, О., & Костів, Н. (2010). Пристрій компенсації температури вільних кінців первинних термоелектричних перетворювачів. *Вимірвальна техніка та метрологія*, (71), 120-124.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлена дисертація, та у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science

17. Барило, Г. І., Бойко, О. В., Голяка, Р. Л., Марусенкова, Т. А., Прудіус, І. Н., & Фабіровський, С. Є. (2019). Сигнальний перетворювач функціонально інтегрованих термомагнітних сенсорів. *Вісник НТУУ" КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, (76), 63-71.

18. Boyko O., & Hotra O. (2019) Improvement of dynamic characteristics of thermoresistive transducers with controlled heating *Przegląd elektrotechniczny*, (5), 110-113.

19. Boyko, O., Barylo, G., Holyaka, R., Hotra, Z., & Ilkanych, K. (2018). Development of signal converter of thermal sensors based on combination of thermal and capacity research methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/9 (94), 36-42.

20. Bashtyk, Y., Bojko, O., Fechan, A., Grzyb, P., & Turyk, P. (2017). Primary converters for optical sensors of physical values based on polymer dispersed cholesteric liquid crystal. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 642(1), 41-46.

21. Hotra, O., & Boyko, O. (2012). Compensation bridge circuit with temperature-dependent voltage divider. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(4A), 169-171.

22. Hotra O., & Boyko O. (2012). Temperature measuring device based on thin film thermoresistors. *Proceedings of Electrotechnical Institute*, 260, 207- 218.

23. Hotra O., & Boyko O. (2011). Tranzystorowo-rezystancyjny układ kompensacji wpływu temperatury wolnych końców termopary. *Proceedings of Electrotechnical Institute*, 249, 21-27.

Статті в матеріалах конференцій, які індексовані у наукометричних базах Scopus та Web of Science

24. Fechan, A., Ivaniuk, K., Dupliak, I., Boyko, O., Kotsarenko, M., Kotsun, V., & Fechan, N. (2018). OLED-LC structures for primary transducers of optical temperature sensors. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 670(1), 74-79.

25. Hotra, O., Boyko, O., & Zyska, T. (2014). Improvement of the operation rate of medical temperature measuring devices. *Proceedings of SPIE*, 92914, 92910A-1 – 92910A-6.

26. Boyko, O., & Hotra, O. (2015). Analogue linearization of transfer function of resistive temperature transducers. *Proceedings of SPIE*, 9662, 966247-1 – 966247-8.

27. Boyko, O., Holyaka, R., Hotra, Z., Fechan, A., Ivanyuk, H., Chaban, O., Zyska, T., & Shedreyeva I. (2018). Functionally integrated sensors of thermal quantities based on optocoupler. *Proceeding of SPIE*, 10808, 1080812-1 – 1080812-6.

28. Boyko, O., & Hotra, O. (2018). Correction of dynamic characteristics of temperature measuring devices. *Proceedings of SPIE*, 10808, 1080858-1 – 1080858-7.

29. Mykytyuk, Z., Fechan, A., Petryshak, V., Barylo, G., & Boyko, O. (2016, February). Optoelectronic multi-sensor of SO₂ and NO₂ gases. *XIII International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science” (TCSET’2016)* (pp. 402-405). IEEE.

30. Fechan, A., Kremer, I., Bashtyk, Y., & Boyko, O. (2017, July). Computer simulation of optical and dynamic properties of the polymer—Liquid crystal system for optoelectronics devices. *2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)* (pp. 278-281). IEEE.

31. Boyko, O., Holyaka, R., & Hotra, Z. (2018, February). Functionally integrated sensors on magnetic and thermal methods combination basis. *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. (TCSET’2018)* (pp. 697-701). IEEE.

**Праці, що опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та
всеукраїнських конференцій**

32. Hotra, O., & Boyko, O. (2009). Microprocessor temperature meter for dentistry investigation. *6th International Conference New electrical and electronic technologies and their industrial implementation : NEET 2009*. (p. 42). Zakopane, Poland.

33. Hotra, O., & Boyko, O. (2011). Compensation bridge circuit with temperature-dependent voltage divider. *Advanced Numerical Modelling: IPhDW*. (p. 141-142). Warsaw-Lublin-Zielona Gora, Poland.

34. Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Ільканич В.Ю., Годинюк І.М., & Бойко О.В. (2012). Стабілізація режимів роботи гальваноманітних перетворювачів магнітного поля. *II Міжнародна науково-практична конференція "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки"*. (с. 197). Чернівці.

35. Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Ільканич В.Ю., Марусенкова Т.А., & Бойко О.В. (2013). Структурно-алгоритмічні рішення завадостійких холлівських сенсорних пристроїв з Wake-up режимом роботи. *14-та Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні інформаційні та електронні технології", СИЭТ-2013*. (с. 244-247). Одеса.

36. Готра З.Ю., Голяка Р.Л., & Бойко О.В. (2013). Модельні дослідження характеристик диференційних сенсорів температури на транзисторних структурах. *III-я міжнародна науково-практична конференція "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки"*. (с. 179). Чернівці.

37. Hotra Z., Boyko O., & Holyaka R. (2014). Model Research of the Calorimetric Sensor Scheme Based on a Transistor Transducer. *Proceedings of the XII International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science"*. (pp.323-324). Lviv-Slavske.

38. Баштик Ю.В., Бойко О.В., Вісьтак М.В., Готра З.Ю., & Фечан А.В. (2016). Моделювання процесу розповсюдження світла в структурах пориста матриця – РК для оптичних сенсорів шкідливих речовин *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах"*, (с. 254). Чернівці.

39. Bashtyk, Y., Wojko, O., Fechan, A., Grzyb, P., & Turyk, P. (2017). Primary converters for optical sensors of physical values based on polymer dispersed cholesteric liquid crystal. *The jubilee 10-th international conference "Electronic processes in organic and inorganic materials"*. (p. 330). Ternopil.

40. Бойко, О.В., & Чабан О.П. (2016). Підвищення швидкодії вимірювання температури біологічних об'єктів. *Всеукраїнська науково-практична конференція "Промислова автоматизація в Україні. Просвіта та підготовка кадрів"*. (с.3). Львів.

41. Бойко, О. В., Голяка, Р. Л., Готра., З. Ю., & Чабан О. П. (2017). Функціонально-інтегровані сенсори теплових величин. *4-та міжнародна наукова конференція "Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах"*. (с. 116-117). Вінниця.

42. Fechan A., Ivaniuk K., Boyko O., Kotsun V., & Fechan N. (2018). Oled-LC structures for primary transducers of optical temperature sensors *11th International conference "Electronic processes in organic and inorganic materials"*. (p. 206). Ivano-Frankivsk.

43. Бойко О., & Голяка Р. (2019). Функціонально інтегрований термомагнітний вимірювальний перетворювач. *IV міжнародна науково-практична конференція "Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи"*. (с. 82-83). Львів.

Публікації, які додатково відображають зміст дисертаційних досліджень

44. Бойко О.В., Готра О.З., Готра З.Ю., Лопатинський І.Є. (2001). Деклараційний патент на винахід України 34039 Україна. Пристрій для виміру температури. Київ: Державне патентне відомство України.

45. Бойко О.В., Готра О.З., Готра З.Ю., Лопатинський І.Є. (2001). Деклараційний патент на винахід України 34184. Вимірювач температури. Київ: Державне патентне відомство України.

46. Бойко О.В., Готра З.Ю., Готра О.З., Костів Н.В. (2010). Патент України 54329. Вимірювач температури. Київ: Державне патентне відомство України.

47. Бойко О.В., Готра З.Ю., Готра О.З., Костів Н.В. (2010). Патент України 54676. Вимірювач температури. Київ: Державне патентне відомство України.

48. Чабан О. В., Бойко О. В., Сушинський О. Є., Микитюк З. М., Пристай Т. В., Фечан А. В., Петришак В. С. Патент України 91663. Спосіб виготовлення первинного перетворювача оптичного сенсора температури. Київ: Державне патентне відомство України.

49. Голяка, Р. Л., Бойко, О. В., Дорош, Н. В., & Ільканич, В. Ю. (2013). Транзисторний вимірювальний перетворювач біомедичного диференційного скануючого калориметра. *Медична інформатика та інженерія*, 3, 57-58.

50. Бойко О. (2016). Аналогова лінеаризація характеристик терморезистивного перетворювача формуванням компенсаційного струму. *Технічні вісті*, 1(43)/ 2(44), 43-45.

АНОТАЦІЯ

Бойко О.В. Функціонально-інтегровані сенсори термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – Твердотільна електроніка – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2019.

Дисертаційна робота спрямована на розроблення наукових і практичних засад побудови та дослідження функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на основі компонентів твердотільної мікроелектроніки та багатофункціональних сигнальних перетворювачів.

Розроблено нові підходи до побудови мікроелектронних сенсорів термічного аналізу на основі структур твердотільної електроніки (зокрема транзисторних), новизною якої є функціональне інтегрування – використання єдиної мікроелектронної структури перетворювача для керованого нагріву досліджуваного

зразка чи середовища згідно заданого алгоритму модуляції теплового потоку, вимірювання температури чи різниці температур між досліджуваним та опорним зразками, а також вимірювання зміни магнітних, механічних, оптичних чи імпедансних характеристик досліджуваного зразка в процесі модуляції його температури.

Запропоновано подальший розвиток методів електротеплової аналогії для синтезу схем заміщення SPICE моделей сенсорів термічного аналізу, інформативними величинами яких є температура фазових переходів (плавлення, склування, кристалізації тощо) досліджуваної речовини та кількість теплової енергії, яка поглинається чи виділяється в процесі такого переходу. Метод реалізовано на новому універсальному SPICE компоненті – Thermicar, який моделює фазовий перехід досліджуваної сенсором речовини з можливістю акумуляції теплової енергії.

Встановлено критерії оцінки точності функціонування сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах на основі мінімізації похибки лінійної апроксимації та розроблено методи оптимізації режиму роботи таких сенсорів.

Вперше синтезовано структуру функціонально-інтегрованого сенсора температури на основі органічних світловипромінювальних та фоточутливих матеріалів, що поєднує джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання та характеризується високою температурною чутливістю (30 нм/°C).

Розроблено нові функціонально-інтегровані сенсори термічного аналізу, що поєднують дослідження термічних і магнітних чи механічних властивостей досліджуваних об'єктів. Пристрої характеризуються високими значеннями роздільної здатності вимірювання температури (менше 0,001°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.

Ключові слова: структури твердотільної електроніки, сенсори термічного аналізу, функціональне інтегрування, SPICE модель, сигнальний перетворювач.

АННОТАЦИЯ

Бойко О.В. Функционально-интегрированные сенсоры термического анализа на структурах твердотельной электроники. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника - Национальный университет "Львовская политехника", Министерство образования и науки Украины, Львов, 2019.

Диссертационная работа направлена на разработку научных и практических основ построения и исследования функционально-интегрированных сенсоров термического анализа на основе компонентов твердотельной микроэлектроники и многофункциональных сигнальных преобразователей.

Разработаны новые подходы к построению микроэлектронных сенсоров термического анализа на основе структур твердотельной электроники (в частности транзисторных), новизной которых является функциональное интегрирование -

использование единой микроэлектронной структуры преобразователя для управляемого нагрева исследуемого образца или среды согласно заданному алгоритму модуляции теплового потока, измерения температуры или разницы температур между исследуемым и опорным образцами, а также измерения изменения магнитных, механических, оптических или импедансных характеристик исследуемого образца в процессе модуляции его температуры.

Предложено дальнейшее развитие методов электротепловой аналогии для синтеза схем замещения SPICE моделей сенсоров термического анализа, информативными величинами которых являются температура фазовых переходов (плавления, стеклования, кристаллизации и т.д.) исследуемого вещества и количество тепловой энергии, которая поглощается или выделяется в процессе такого перехода. Метод реализован на новом универсальном SPICE компоненте - Thermisar, который моделирует фазовый переход исследуемого сенсором вещества с возможностью аккумуляции тепловой энергии.

Установлены критерии оценки точности функционирования сенсоров разностной температуры на транзисторных каскадах на основе минимизации погрешности линейной аппроксимации и разработаны методы оптимизации режима работы таких сенсоров.

Впервые синтезирована структура функционально-интегрированного сенсора температуры на основе органических светоизлучающих и фоточувствительных материалов, которая сочетает источник излучения, оптически активную среду и детектор излучения, а также характеризуется высокой температурной чувствительностью (30 нм/°C).

Разработаны новые функционально-интегрированные сенсоры термического анализа, сочетающие исследования термических и магнитных или механических свойств исследуемых объектов. Устройства характеризуются высокими значениями разрешающей способности измерения температуры (меньше 0,001°C) и соответствуют критериям и требованиям микроэлектронных устройств Интернета вещей: однополярное низковольтное питание (3-5 В), минимальное энергопотребление (10^{-5} - 10^{-2} Вт), функционирование в широком диапазоне входных и выходных напряжений (rail-to-rail режима работы), универсальность и стабильность функционирования при изменении внешних воздействий.

Ключевые слова: структуры твердотельной электроники, сенсоры термического анализа, функциональное интегрирование, SPICE модель, сигнальный преобразователь.

ABSTRACT

Boyko O.V. Functionally integrated sensors of thermal analysis based on solid state electronics structures. - On the rights of manuscript.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences on specialty 05.27.01 - Solid State Electronics - Lviv Polytechnic National University, The Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of scientific and practical principles of construction and research of the functionally integrated sensors of a thermal analysis on

the basis of components of solid-state microelectronics and multifunctional signal converters.

New approaches to the construction of microelectronic sensors of thermal analysis based on structures of solid-state electronics (in particular transistor ones) have been developed. The novelty is the functional integration – the usage of a single microelectronic structure of the converter for the controlled heating of the sample or medium, according to a given algorithm of modulation of heat flow, the measurement of temperature or temperature difference between the sample and the reference, as well as measurement of changes in magnetic, mechanical, optical and impedance characteristics of the sample during its temperature modulation.

The operation modes of two-functional transistor converters providing controlled heating and temperature measurements are analysed. The heating is carried out by the controlled thermal power, dissipated on the transistor, and the temperature measurement is appropriately measured by one of the temperature-dependent parameters. Functional principles are proposed, and parametric analysis of control circuits of two-function transistor converters is carried out. The proposed solutions are based on current sources and feedback circuits, which form independent control of the voltage and current in the transistor circuit.

The further development of the method of thermal analogy is proposed for the synthesis of substitution schemes of SPICE models of thermal analysis sensors, whose informative quantities are the temperature of phase transitions (melting, glass transition, crystallization, etc.) of the investigated substance and the amount of thermal energy that is absorbed or released during such transition. The method of electro-thermal analogy is to substitute thermal characteristics with their electrical analogues: the temperature difference $\Delta T(t)$ is replaced by the voltage difference $\Delta U(t)$, the heat flux Φ_T or the power P_T is replaced by the electric current I_T , and the thermal resistance R_θ and the heat capacity C_θ – by their equivalent electrical resistance R_T and capacitance C_T . Thermal transition processes are described by Foster and Cauer equivalent circuits in the form of several RC units. The method is implemented on a new universal SPICE component - Thermicap, which simulates the phase transition of the investigated substance with the possibility of thermal energy accumulation.

Research and optimization of operation modes of differential temperature sensor at transistor cascades are carried out. Differential temperature measurement transducers on elementary transistor cascades, transistor cascades of differential type and differential cascade with temperature dependent current source are considered. Inherent regularities of temperature characteristics are established, on the basis of which it is possible to optimize the operation mode of the differential temperature sensor. It is shown that the nonlinearity of the transition function of the differential temperature sensors on the transistor cascades depends to a great extent on such parameters of the transistors as a current amplification coefficient, the resistance of the regions of the integral structure, the Early voltage, etc. The criteria of accuracy estimation of differential temperature sensors' functioning on transistor cascades are established on the basis of minimization of linear approximation error, and methods of optimization of an operation mode of such sensors are developed.

For the first time, the structure of a functionally integrated temperature sensor, based on organic light-emitting and photosensitive materials, is synthesized. It combines a

radiation source, an optically active medium and a radiation detector, and is characterized by high temperature sensitivity ($30 \text{ nm}/^\circ\text{C}$). A temperature monitoring system with space-based diversity of measurement points based on polymer-dispersed liquid crystal primary transducers is proposed. It is ensured by the use of liquid crystal materials with different temperature dependencies of selective reflection maxima, allowing the use of one optical channel.

Methods and means of optimization of structural and circuit solutions of temperature sensors on thermo-resistive and thermoelectric converters have been developed. The proposed solutions reduce the nonlinearity error of the conversion function (0,01% within the range $0 \dots 800^\circ\text{C}$) and temperature measurement time (less than $0,5 \tau_0$ (τ_0 - time constant of the RTD)). Approaches to the compensation of the impact of wire lines resistance are considered. The new structures of two-layer film RTD bridge circuits that have provided absolute and differential temperature measurement with a resolution of $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ within the range $-10 \dots 100^\circ\text{C}$ have been developed.

The examples of hardware and software implementation of microelectronic thermal analysis sensors are represented, in particular, the signal converter of functionally integrated thermomagnetic sensors, the differential temperature sensor with an integration function, and the signal converter of thermal analysis sensors based on a combination of thermal and capacitive investigation methods. The devices are characterized by high values of the resolution of temperature difference measurement (less than $0,001^\circ\text{C}$), and meet the criteria and requirements of microelectronic devices of the Internet of Things: unipolar low-voltage power supply (3-5 V), minimum energy consumption (10^{-5} - 10^{-2} W), functioning in a wide range of input and output voltages (rail-to-rail modes), versatility and stability of operation while changing the external influences.

Keywords: solid-state electronics structures, thermal analysis sensors, functional integration, SPICE model, signal converter.