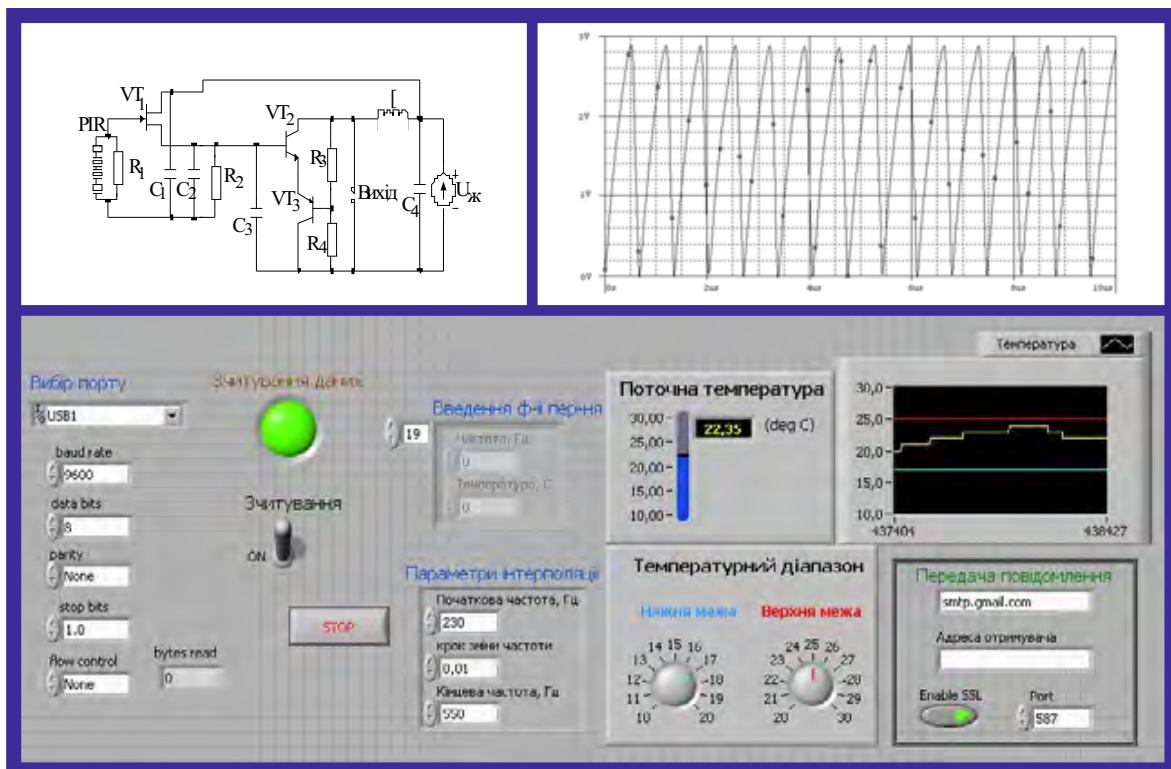


В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан

Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР
З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ
ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО ТЕПЛОВОГО
КОНТРОЛЮ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2015

УДК 621.3.082.63
ББК 31.32-5
О-72

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 29.05.2014 р.)

Рецензенти:

В. Ю. Кучерук, доктор технічних наук, професор

В. Г. Петрук, доктор технічних наук, професор

Л. Ф. Політанський, доктор технічних наук, професор

Осадчук, В. С.

О-72 Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 212 с.

ISBN 978-966-641-599-1

В монографії проаналізовано сучасний стан вимірювальних перетворювачів для неруйнівного теплового контролю, подано основи побудови радіовимірювальних перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Розглянуто принципи побудови, електричні схеми та експериментальні дослідження основних параметрів радіовимірювальних перетворювачів. Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою радіовимірювальних перетворювачів, а також на аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 621.3.082.63
ББК 31.32-5

ISBN 978-966-641-599-1

© В. Осадчук, О. Осадчук, С. Барабан, 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЮ	8
1.1 Класифікація сучасних методів неруйнівного теплового контролю.....	8
1.2 Огляд сучасних пристроїв для вимірювання температури	21
1.3 Огляд засобів диференційно-термічного аналізу твердих тіл	31
1.4 Систематизація вимірювальних перетворювачів для неруйнівного теплового контролю	38
2 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЮ	57
2.1 Розробка математичної моделі первинного вимірювального перетворювача.....	57
2.2 Функціонально-схемна організація вимірювальних перетворювачів для теплового контролю на основі ТСВО.....	65
2.3 Розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача на основі структури метал–піроелектрик–метал.....	87
2.4 Розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача на основі структури метал–піроелектрик–напівпровідник.....	96
2.5 Розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача на основі сегнетоелектричного конденсатора	103
2.6 Дослідження динамічних процесів у вимірювальному каналі перетворювача на основі транзисторної структури з від’ємним опором.....	110
3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ СТРУКТУРНО-ЧУТЛИВИХ ПАРАМЕТРІВ ТВЕРДИХ ТІЛ.....	119
3.1 Математична модель термодинамічного процесу в некристалічних напівпровідниках	120
3.2 Математична модель радіовимірювального перетворювача на основі транзисторної структури з від’ємним опором	127
3.3 Метод контролю структурно-чутливих параметрів твердих тіл на основі диференційно-термічного аналізу.....	140

3.4 Засіб контролю структурно-чутливих параметрів твердих тіл	144
3.5 Оцінювання похибок засобу контролю	153
3.6 Аналіз метрологічних характеристик засобу контролю.....	159
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ	163
4.1 Рекомендації з проектування радіовимірювальних перетворювачів для неруйнівного теплового контролю	163
4.2 Експериментальні дослідження схеми радіовимірювального перетворювача для неруйнівного теплового контролю	168
4.3 Дослідження вимірювальної системи для неруйнівного теплового контролю	176
4.4 Експериментальні дослідження засобу контролю структурно-чутливих параметрів твердих тіл	183
ЛІТЕРАТУРА	194
ДОДАТОК А Розрахунок статистичних характеристик похибки вимірювань	209

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач
АЧХ – амплітудо-частотна характеристика
БіМООН – біполярний метал–оксид–діелектрик
БТПК – біполярний транзистор з польовим керуванням
БТ – біполярний транзистор
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ВО – від’ємний опір
ДТА – диференційний термічний аналіз
ДПВ – датчик потужності випромінювання
ДПН – джерело постійної напруги
е. р. с. – електрорушійна сила
ІЧ – інфрачервоне (випромінювання)
МЕМС – мікроелектромеханічні системи
МДН – метал–діелектрик–напівпровідник
МПЕН – метал–піроелектрик–напівпровідник
МСЕН – метал–сегнетоелектрик–напівпровідник
НКД – кероване джерело, що не вилучається (зі схеми)
ПК – персональний комп’ютер
ПТП – перетворювач теплової потужності
ПТ – польовий транзистор
ТСВО – транзисторна структура з від’ємним опором
САВ – схемно-алгебраїчний вираз
ССФ – символна схемна функція
СЕ – сегнетоелектрик
ФЧХ – фазо-частотна характеристика
РВП – радіовимірювальний перетворювач

ВСТУП

При дослідженні фізичних властивостей речовин у задачах контролю теплових режимів різноманітних технологічних процесів першочергове значення мають температурні вимірювання, які на сьогодні складають близько 40 % усіх вимірювань, які здійснюються в промисловості [1]. У багатьох випадках необхідно здійснювати вимірювання температури важкодоступних технічних об'єктів, об'єктів, які знаходяться під електричним потенціалом у радіоактивному або агресивному середовищі. Для цього доцільно використовувати безконтактні методи теплового контролю температури, зокрема контроль температури за випромінюванням.

На сьогоднішній день розробкою теорії і практичного застосування піроелектричних структур займаються в таких наукових закладах, як Запорізька державна інженерна академія, Інститут фізики НАН України, Національний університет «Львівська політехніка». Значний вклад в розробку теорії і практичного застосування перетворювачів температури внесли вчені: Ж. Аш [2], Н. Како [3], Г. Виглеб [4], І. М. Вікулін [5], Я. Ямоне [3], Новіцький П. В. [6]. В розробку теорії піроефекту значний вклад внесли російські вчені: М. Лайнс [7], Л. С. Берман [8], Н. Д. Гаврілова [9], А. С. Сонін [10], Н. Р. Іванов [11], японські вчені Y. Watanabe, M. Tanamura, Y. Matsumoto [12]. Значний вклад в розробку теорії і практичного застосування піроелектричних перетворювачів температури внесли: американська школа вчених з D. V. A. Rep, M. W. Prins [13], німецька школа вчених на чолі з S. L. Miller [14], російські вчені Е. І. Болвановіч [15], В. К. Новік [16], А. С. Сігов [17], Б. А. Струков [18], українські науковці Є. М. Кісельов, Е. Я. Швець, В. Л. Костенко [19].

Подальшим розвитком наукових досліджень у цьому напрямку для поліпшення параметрів перетворювачів теплового контролю є застосування реактивних властивостей і від'ємного опору для побудови інтегральних радіовимірювальних перетворювачів. Цей напрямок досліджень базується на досягненнях наукової школи Вінницького національного технічного університету в розробці і дослідженні теоретичних основ реактивних властивостей і від'ємного опору у напівпровідникових приладах, що викладено у монографіях д. т. н., проф. В. С. Осадчука [20], теоретичні дослідження і розробку перетворювачів температури проведено д. т. н., проф. О. В. Осадчуком [21].

Провідні позиції в області розробки піроелектричних перетворювачів для теплового контролю займають такі компанії: InfraTec, Dias Angewandte (Німеччина), Murata Manufacturing (Японія). З іншого

боку в якості запатентованих конструкцій піроелектричних перетворювачів для теплового контролю домінують США [22].

Актуальність теми дослідження полягає в тому, що на основі транзисторних структур з від'ємним опором можна значно покращити точність і чутливість приладів контролю температури та розширити її діапазон у порівнянні з класичними пристроями контролю температури, а також можливо створити нові технічні засоби для систем контролю та захисту технічного стану об'єктів.

Використання частоти як інформативного параметра характеризується високою завадостійкістю передачі, простотою і значною точністю перетворення в цифровий код, а також виключає використання АЦП при обробці інформації, що знижує собівартість систем контролю і управління.

Переважає більшість високоефективних пристроїв сенсорної електроніки створено на основі структури метал–оксид–напівпровідник. При цьому не завжди виходить залишитися в рамках стандартних технологій інтегральних схем, що в низці випадків пов'язана з необхідністю використання нових нетрадиційних матеріалів, до яких можна віднести і сегнетоелектрики. Такі матеріали, окрім цілого спектру корисних для використання фізичних властивостей, володіють здатністю поляризуватися під дією зміни температури, тобто в них спостерігається піроелектричний ефект, що дозволяє використовувати їх в якості основи для створення термочутливих елементів.

Завдяки успіхам, досягнутим в області технологій отримання сегнетоелектричних матеріалів, почав інтенсивно розвиватися важливий напрямок сенсорної електроніки, який має назву МЕМС і об'єднує системи, отримані в результаті інтеграції сенсорів, актуаторів і спеціальних керуючих електронних схем з традиційними інтегральними напівпровідниковими схемами.

Проблеми існуючих приладів контролю температури можна подолати шляхом використання мікроелектронних радіовимірювальних перетворювачів температури на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Такі засоби теплового контролю мають низку переваг перед існуючими:

- 1) висока завадостійкість, що забезпечує високу точність вимірювання температури;
- 2) потужний вихідний сигнал, що дозволяє відмовитись від підсилювачів в подальшій обробці сигналу;
- 3) відмова від АЦП при обробці сигналу, що підвищує економічність пристрою;
- 4) можливість передачі інформації на відстань.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ

Тепловий контроль – це такий метод неруйнівного контролю, що базується на реєстрації температурних полів об'єкта контролю. Методи неруйнівного контролю теплового виду використовують при дослідженні теплових процесів у виробках. При порушенні термодинамічної рівноваги об'єкта з навколишнім середовищем на його поверхні виникає надлишкове температурне поле характер якого дозволяє отримати інформацію про властивості об'єкта, що становлять інтерес. Методи теплового контролю базуються на взаємодії теплового поля об'єкта з термодинамічними чутливими елементами (термопарою, фотоприймачем, рідкокристалічним індикатором і т. д.), перетворенні параметрів поля (інтенсивності, температурного градієнта, контрасту, яскравості та ін.) в електричний сигнал і передачі його на реєструвальний прилад. Перевагами теплового контролю є: дистанційність, високі швидкість обробки інформації, продуктивність випробувань, лінійне розширення, можливість контролю при одно- і двосторонньому підході до виробу, а також теоретична можливість контролю будь-яких матеріалів, багатопараметричний характер випробувань, можливість взаємодоповняльного поєднання ТНК з іншими видами неруйнівного контролю, сполучуваність зі стандартними системами обробки інформації, можливість поточного контролю і створення автоматизованих систем контролю і керування технологічними процесами.

1.1 Класифікація сучасних методів неруйнівного теплового контролю

В залежності від призначення і галузі застосування тепловий неруйнівний контроль поділяють на теплову дефектоскопію, безконтактну пірометрію і тепловізуалізацію. Об'єктами теплової дефектоскопії є дефектні структури, що містять тріщини, пустоти, пори, раковини, місця непроварювання, непроклеювання, поганої тепло- і електроізоляції, неоднорідності складу, сторонні добавки, місця термічного і втомлюванісного перенапруження та інші дефекти. Методи теплової дефектоскопії передбачають якісний контроль теплової неоднорідності об'єктів, що контролюються.

Методи безконтактної пірометрії використовують для кількісного вимірювання температури різних об'єктів і процесів.

Тепловізуалізація – це відносно новий напрямок в техніці теплового неруйнівного контролю, що використовує різні засоби візуалі-

зації теплових полів і зображень. Тепловізійні системи можуть бути використані як для цілей теплової дефектоскопії, так і для цілей безконтактної пірометрії.

Згідно з ДСТУ параметри, що входять до теплового неруйнівного контролю: температура, теплопровідність, теплоємність, градієнти температур, тепла постійна часу, коефіцієнт випромінювання, індикатриса випромінювальної здатності, потік випромінювання, геометричні розміри об'єктів, розміри дефектів, геометрична форма об'єктів, форма дефектів.

Оптична пірометрія, пірометрія за випромінюванням, інфрачервона пірометрія, пірометрія сумарного випромінювання – це тільки деякі назви методів безконтактної термометрії, які ґрунтуються на вимірюванні параметрів теплового випромінювання. Теплове випромінювання виникає внаслідок теплового збудження частинок речовини (атомів, молекул). Енергія згаданого випромінювання визначається тільки температурою й оптичними властивостями тіла, що випромінює.

Нижче подано основні визначення, які стосуються характеристик випромінювання. Для опису спектральних характеристик випромінювання можна скористатися шкалою довжин хвиль, шкалою частот чи хвильовими числами, але у пірометрії перевагу віддають шкалі довжин хвиль.

З енергетичної точки зору випромінювання характеризують такими величинами, як потік випромінювання, сила випромінювання (сила світла енергетична), енергетична світність та енергетична яскравість.

Потік випромінювання Φ (потужність випромінювання) дорівнює потоку енергії, яка випромінюється тілом у півсферу за одиницю часу: $\Phi = dW/d\tau$. Сила випромінювання I – це просторова густина випромінювання, яка дорівнює відношенню потоку випромінювання $d\Phi$ від джерела випромінювання, що поширюється за одиницю часу у середині елементарного тілесного кута $d\Omega$, який містить у собі заданий напрямок, до значення згаданого тілесного кута: $I = d\Phi/d\Omega$. Світність енергетична M – це відношення потоку випромінювання $d\Phi$ від елемента поверхні (який містить розглядувану точку) до площі dA цього елемента: $M = d\Phi/dA$. Яскравість енергетична L – це потужність випромінювання, яка випромінюється в одиничний тілесний кут у заданому напрямі площинкою, площа проекції якої на площину, перпендикулярну до заданого напрямку, дорівнює одиниці площі: $L = d^2\Phi/d\Omega dA \cos\Theta = dI/dA \cos\Theta$, де Θ – кут між нормаллю до поверхні і заданим напрямком. Розрізняють інтегральну і спектральну енер-

гетичні яскравості відповідно для інтегрального та монохроматичного випромінювання.

В пірометрії зазвичай користуються трьома умовними температурами, що відрізняються між собою і від істинної температури тіла на величину поправки, що залежить від випромінювальної здатності цього тіла.

Радіаційна температура (або температура повного випромінювання) вимірюється радіаційним пірометром, в якого перетворювач випромінювання в електричний сигнал чутливий у широкому діапазоні спектра. Сигнал на виході такого перетворювача описується законом Стефана–Больцмана. При цьому, радіаційною температурою вважається така температура реального об'єкта, яка рівна радіаційній температурі абсолютно чорного тіла (АЧТ), що володіє такою ж густиною випромінювання, як і реальний об'єкт. Перехід від радіаційної до істинної температури здійснюється за виразом: $T = T_r \sqrt[4]{1/\varepsilon_T}$, де ε_T – інтегральний коефіцієнт випромінювання тіла.

Яскравісна температура вимірюється пірометром випромінювання в дуже вузькому діапазоні спектра з ефективною довжиною хвилі λ_{ef} і також завжди менша істинної температури реального об'єкта.

Колірна температура (або температура спектральних відношень) визначається за результатом відношення спектральних густин випромінювання об'єкта для різних довжин хвиль. Іншими словами, це така температура АЧТ, при якій відношення спектральних густин випромінювання АЧТ на двох ділянках спектра з ефективними довжинами хвиль λ_1 і λ_2 рівне відношенню спектральних густин випромінювання реального об'єкта на цих же ділянках спектра. Істинна температура визначається за виразом $1/T = 1/T_K + \ln \alpha_{\lambda_1, T} - \ln \alpha_{\lambda_2, T} / C_2 (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)$.

На рис. 1.1 показано класифікацію параметрів, що контролюються при ТНК.

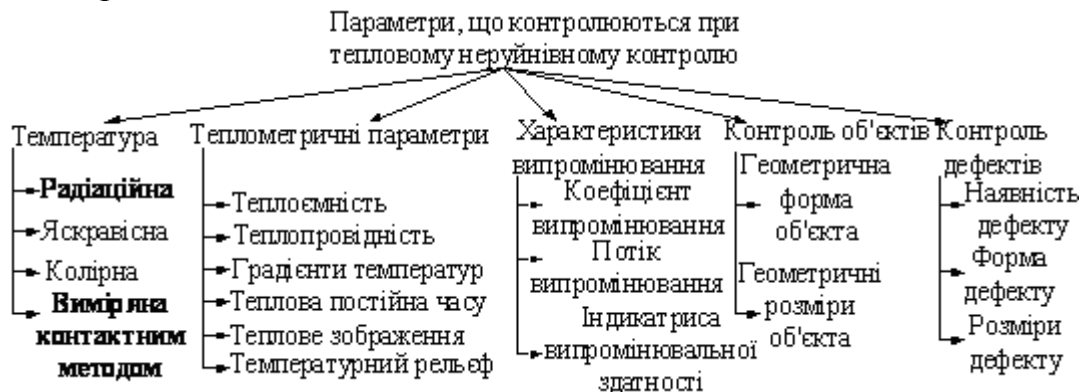


Рисунок 1.1 – Класифікація параметрів контролю при ТНК

Розрізняють два основних методи теплового неруйнівного контролю: пасивний і активний. Пасивний – метод ТНК, при якому об’єкт контролю не піддається дії зовнішнього джерела теплової енергії. Активний – метод ТНК, при якому об’єкт контролю піддається дії зовнішнього джерела теплової енергії. Як видно з визначень, в ТНК головну роль відіграють три складових частини: об’єкт контролю, термочутливий елемент, джерело нагрівання (якщо необхідне). За розміщенням об’єкта теплового контролю і термочутливого елемента пасивний ТНК поділяється на односторонній і двосторонній. Активний ТНК ж за розміщенням один відносно одного джерела нагрівання, термочутливого елемента і об’єкта контролю поділяється на: односторонній, двосторонній, комбінований, синхронний, асинхронний. Схеми основних методів теплового виду наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Схеми основних методів ТНК

Метод контролю	Схема контролю	
	активний	пасивний
Односторонній	<pre> graph LR 1[1] --> 2[2] 3[3] --> 2[2] </pre>	<pre> graph LR 2[2] --> 3[3] </pre>
Двосторонній	<pre> graph LR 1[1] --> 2[2] 2[2] --> 3[3] </pre>	<pre> graph LR 3[3] --> 2[2] 2[2] --> 3[3] </pre>
Комбінований	<pre> graph LR 1[1] --> 2[2] 3[3] --> 2[2] </pre>	-
Синхронний	<pre> graph LR 1[1] --> 2[2] 3[3] --> 2[2] </pre>	-
Несинхронний	<pre> graph LR 1[1] --> 2[2] 2[2] --> 3[3] </pre>	-

Примітка: 1 – джерело нагрівання, 2 – об’єкт контролю, 3 – термочутливий елемент.

Активні методи теплового контролю поділяються на стаціонарні та нестаціонарні, а пасивні методи – на контактні та власного випромінювання (безконтактні). Контактний метод ТК – метод ТНК, що базується на реєстрації температури при безпосередньому контакті чутливого елемента теплового дефектоскопа з поверхнею об'єкта контролю. Метод власного випромінювання – це такий метод ТНК, що базується на реєстрації температури при відсутності безпосереднього контакту чутливого елемента теплового дефектоскопу з поверхнею об'єкта контролю. Крім того, методи теплового контролю діляться на статичні та динамічні. В цьому випадку визначальним фактором є залежність температури об'єкта від часу.

В методі активного теплового неруйнівного контролю можна виділити три основних напрямки: тепла дефектоскопія, тепла дефектометрія, тепла томографія.

Теплова дефектоскопія полягає у визначенні факту наявності дефекту і його розміщення в об'єкті контролю. В наш час найбільш розроблений напрям.

Теплова дефектометрія – напрям активного теплового неруйнівного контролю, що представляє собою методи і засоби кількісної оцінки глибини залягання дефектів, їх товщини і поперечних розмірів. З математичної точки зору ТД потребує розв'язання зворотних теплофізичних задач.

Теплова томографія є наступним розвитком ТД і полягає в поширеному синтезі внутрішньої структури об'єкта контролю на основі використання методів проективної комп'ютерної томографії.

Перспективні методи ТНК: вібротепловізійний, метод теплової томографії, метод ТНК на основі термофотопружності, тепловий метод контролю вологості, електромагнітнотепловий, радіотепловий, фазова термографія, теплографічний неруйнівний контроль композитив, фототермоакустичні методи неруйнівного контролю.

Вібротепловізійний метод особливо перспективний для аналізу виробів, що працюють в умовах вібрацій. В матеріалах з дефектами структури під впливом вібрації виникають температурні поля, що обумовлено розсіянням енергії коливань на дефектах і перетворенням її в теплоту за рахунок внутрішнього перегріву в матеріалі. В областях порушення структури виникають локальні зони перегріву об'єкта. На термограмах віброуючих пластин і інших об'єктів чітко виявляються дефекти типу розшарувань та ін.

Теплова томографія (ТГ) – метод візуалізації внутрішніх перерізів об'єкта за допомогою теплових ефектів. Його можна реалізувати імпульсним опроміненням об'єкта плоским рівномірним пучком випромінювання і послідовною реєстрацією «теплових відбитків» defe-

ктів теплофізичних параметрів контрольованої структури на протилежній стороні виробу за допомогою швидкодійного тепловізора.

Методи теплового контролю на основі термофотопружності. У сучасних технологіях, особливо лазерній, широко застосовуються високопрозорі оптичні кристали, наприклад, в якості лінз для фокусування форсованого випромінювання, резонаторів потужних лазерів, захисних ілюмінаторів, матеріалів для витяжки ІЧ світловодів і т. п. Найважливішою характеристикою подібних матеріалів є абсолютне значення натурального показника поглинання оптичного випромінювання, який, у свою чергу, визначає частку енергії, поглинену в матеріалі при проходженні через нього потужного потоку випромінювання. Ця характеристика дозволяє прогнозувати променеву міцність матеріалів, динаміку їх розігрівання в процесі опромінення, втрати в лініях світловодного зв'язку і т. д.

Тепловий метод контролю вологості. Наявність вологи в об'єктах, особливо пористих, з розвиненою поверхнею обумовлює інтенсивний процес випаровування за рахунок інфільтрації води з підповерхневих областей матеріалу. Процес випаровування супроводжується зменшенням температури поверхні об'єкта. Тепловізійні методи дозволяють дистанційно наочно і оперативно визначати місця накопичення вологи в об'єктах за термографічним зображенням, на якому зони з підвищеною інтенсивністю випари виглядають як менш нагріті.

Електромагнітно-тепловий метод заснований на радіоімпульсному збудженні металевих об'єктів полем індуктора, прийомі теплового відгуку приповерхневим перетворювачем в час і після теплової дії та подальшому аналізу амплітудно-тимчасової інформації. Хід теплового процесу визначається теплофізичними і одночасно електромагнітними параметрами об'єкта, що дозволяє в одному експерименті проводити дослідження як тепловими, так і вихрострумовими методами.

Радіотепловий метод. В процесі ТНК необхідно реєструвати об'ємний розподіл температури в об'єктах. Одним з методів вимірювання температури приповерхневих і глибинних шарів виробів з діелектриків, прозорих в радіодіпазоні (діапазон довжин хвиль від 1 до 100...150 мм), може бути СВЧ термометрії (СВЧТ). Більшість матеріалів непрозорі в ІЧ-діпазоні спектра, але добре пропускають СВЧ випромінювання. Глибина проникнення істотно залежить від довжини хвилі і хімічного складу речовини.

Фазова термографія. При скануванні об'єкта сфокусованим лазерним пучком, переміщення якого синхронізовано з розгорткою ІЧ-камери тепловізора, можна реєструвати фазові термограми, тобто залежність від часу зміни температури в кожній точці термограми. Метод дозволяє істотно понизити вплив неоднорідності випромінюваль-

ної здібності поверхні об'єкта. Особливо ефективний він для контролю тонких плівок, різних покриттів і т. п. об'єктів.

Теплографічний неруйнівний контроль композитів. Контроль тонкостінних оболонок з полімерних композиційних матеріалів, міцність яких суттєво залежить від дефектів типу повітряних розшарувань, «злипнутих» відшарувань і так далі, ефективний з допомогою комбінованого теплологографічного методу. Він полягає в нагріві (тепловому навантаженні) виробів і одночасній реєстрації термограм і голографічних інтерферограм нагрітої поверхні. При цьому виявлення дефектів відбувається за наявності аномалій інтерференційних смуг, а їх протяжність і глибина залягання визначається завдяки аналізу термограм контрольованої зони виробу при його нагріві галогенними лампами.

Фототермоакустичні методи. У методі фототермоакустики лазерне (в загальному випадку оптичне) випромінювання проходить через оптичну систему і потрапляє на поверхню досліджуваного зразка, в якому під дією випромінювання створюються температурні і акустичні поля, по яких можна судити про структуру і параметри виробу. Поглинання лазерного імпульсу призводить до нестационарного підвищення температури поверхневого шару як поглинаючого, так і (за рахунок теплопровідності) прозорого середовища. При цьому відбувається збудження акустичних хвиль як в прозорому, так і в поглинаючому середовищі.

Як відомо, будь-яка класифікація носить умовний характер і у літературі можна зустріти різні варіанти класифікації методів та засобів вимірювання температури: за принципом дії, за структурними ознаками, за функціональними ознаками тощо.

В залежності від характеру взаємодії первинного перетворювача термометра з об'єктом вимірювання розрізняють контактні та безконтактні методи вимірювання.

До контактних методів вимірювання температури відносять методи, побудовані на різних принципах перетворення температури у фізичну величину, яку можна безпосередньо виміряти, та за умови теплового контакту між об'єктом вимірювання та первинним перетворювачем термометра. Основна вимога до контактних методів вимірювання температури – це мінімальна різниця між температурою чутливого елемента термометра та температурою об'єкта вимірювання.

До групи безконтактних методів відносять методи, побудовані на різних принципах перетворення теплового випромінювання у фізичну величину, яку можна безпосередньо виміряти. Причому тепловий контакт між об'єктом вимірювання та первинним перетворювачем термометра не є обов'язковим. Безконтактні методи вимірювання температури не вимагають тотожності температури чутливого елемента

термометра та температури об'єкта вимірювання. Як синонім виразу «безконтактні методи вимірювання температури» застосовують вираз «пірометричні методи вимірювання температури», а вимірювання виконують пірометрами. У табл. 1.2 [23] подано перелік властивостей спектра випромінювання об'єкта, які можна використовувати для вимірювання температури, та засобів вимірювання температури.

Таблиця 1.2 – Безконтактні методи вимірювання температури

Властивості спектра випромінювання об'єкта	Засіб вимірювання
Інтегральна енергетична яскравість тіла, яку з достатнім наближенням описують законом Стефана–Больцмана для абсолютного чорного тіла	Піротермометр повного випромінювання (пірометр радіаційний)
Енергетична яскравість тіла в обмеженому інтервалі довжин хвиль, у якому не можна застосовувати формулу Планка та закон Стефана–Больцмана	Пірометр часткового випромінювання
Енергетична яскравість тіла у вузькому інтервалі довжин хвиль, у якому можна застосовувати формулу Планка	Квазімонохроматичний пірометр (пірометр яскравісний, пірометр оптичний)
Спектральний розподіл енергетичної яскравості тіла	Пірометр спектрального розподілення
Відношення енергетичних яскравостей у двох спектральних інтервалах	Пірометр спектрального відношення (пірометр колірний)
Відношення енергетичних яскравостей у трьох чи більше спектральних інтервалах	Пірометр багаторазового спектрального відношення

У роботах О. Гордова наведена класифікація методів та засобів вимірювання, які автор відносить до високотемпературної термометрії [24].

У сучасній термометрії застосовується велика кількість різноманітних методів вимірювання, що пов'язано з відмінностями вимог для різних діапазонів температур, розмаїттям об'єктів вимірювання та умов на них, особливостями характеристик робочих речовин, температуру яких вимірюють, тощо. Зрозуміло, що створення еталонних засобів вимірювання для металургії чи для кріомедицини вимагає абсолютно різних підходів. Теж саме стосується вимірювань всередині та на поверхні твердого тіла (умови теплообміну суттєво відрізняються), вимірювань температури поверхні рухомих об'єктів, термоаналітичний аналіз речовин. Під термоаналітичним аналізом складу речовин розуміють методи, в яких досліджується який-небудь фізичний параметр системи в залежності від температури, причому цей фізичний параметр реєструється як динамічна функція температури [25]. Одним із основних методів термічного аналізу є диференційно-термічний аналіз, який полягає в порівнянні термічних властивостей

досліджуваної речовини і термічно інертної речовини, прийнятої в якості еталона. Параметром, що реєструється, при цьому є різниця їх температур, яка вимірюється при нагріванні чи охолодженні зразка речовини з постійною швидкістю. Методи вимірювання температури фазового перетворення речовини базуються на взаємодії теплового поля об'єкта з термодинамічними чутливими елементами (термопарою, фотоприймачем, рідкокристалічним індикатором і т. д.), перетворенні параметрів теплового поля в електричний сигнал і передачі його на вимірювальний прилад.

Усі методи дослідження твердофазних систем можна розділити на дві групи: прямі та непрямі. Винятково важливе значення в дослідженні твердофазних систем мають методи прямого дослідження геометричної організації системи [26]. До недоліків прямих методів відносять складність проведення дослідження, складність при обробці результатів, наявність суб'єктивних похибок оператора, велика вартість обладнання для проведення дослідження. Непрямі методи менш точні, але значно дешевші за прямі, крім того простіші та швидші при проведенні дослідження [27]. На рис. 1.2 наведено класифікацію методів дослідження твердофазних систем.

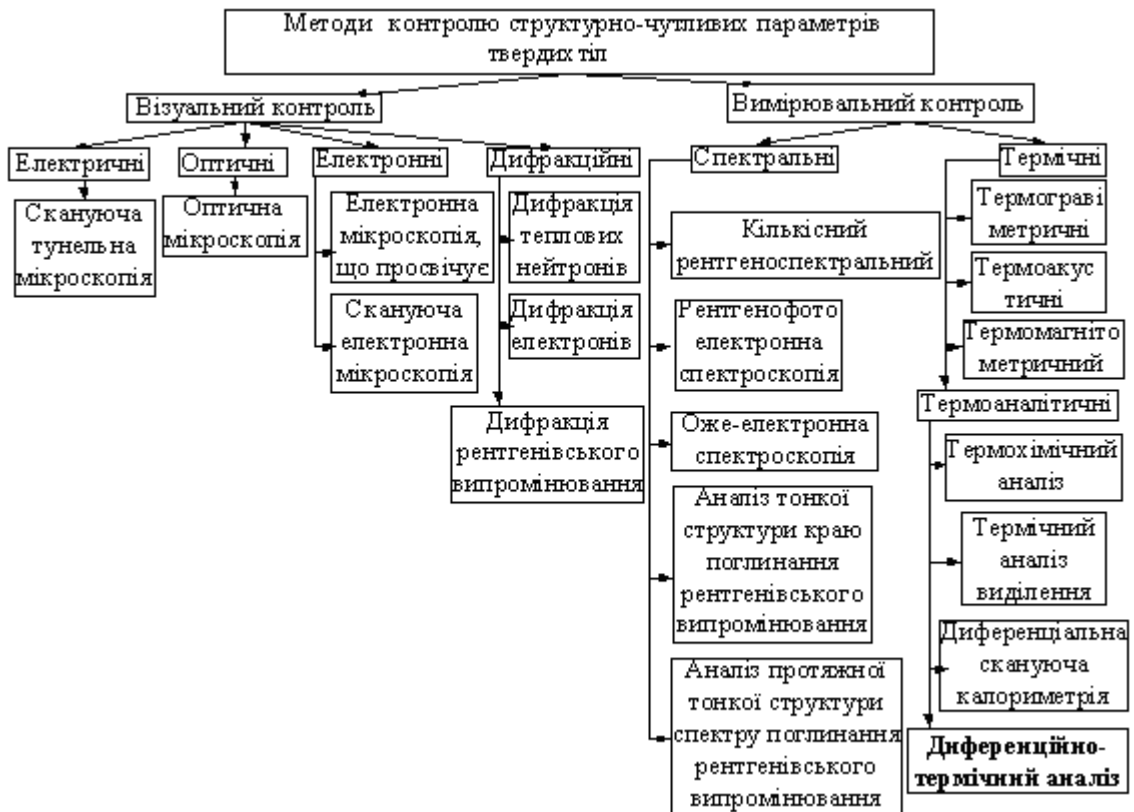


Рисунок 1.2 – Класифікація методів контролю структурно-чутливих параметрів твердих тіл

Оптичну мікроскопію у відбитому світлі застосовують для дослідження мікроструктури матеріалів, розмір характерних деталей в яких має порядок декількох відсотків мікрометра [28]. Дослідження зазвичай проводять на ретельно відшліфованих з наступним травленням зразках. Травлення зразків необхідно для виділення меж зерен (оскільки протікає на них з великою швидкістю). Травлення також дозволяє спостерігати деякі протяжні дефекти (наприклад, виходи дислокацій на поверхні зерна).

В електронній просвічувальній мікроскопії використовують електрони, електростатично прискорені до різних енергій і сфокусовані магнітним полем в спеціальних електромагнітних лінзах [29].

Метод сканувальної електронної мікроскопії полягає в скануванні поверхні зразка максимально сфокусованим електронним пучком з одночасною реєстрацією збудженого цим пучком випромінювання [30].

В останній час в зв'язку з розвитком тонкоплівкових напівпровідникових технологій інтенсивно розвивається група методів, заснована на механічному скануванні поверхні зразка тонкою голкою (кантилевером). Відбувається також її взаємодія з цією поверхнею. До таких методів відносять сканувальну тунельну мікроскопію. При її застосуванні вимірюють (або підтримують постійним) тунельний струм між голкою, на яку подають деякий електричний потенціал, і поверхнею [31].

Застосування тунельної мікроскопії обмежено струмопровідними матеріалами і потребує вакуумування робочої камери. В той же час застосування атомно-силової мікроскопії не має таких обмежень. Атомно-силова мікроскопія дозволяє вимірювати сили міжатомної взаємодії між кантилевером і поверхнею (радіус дії цих сил також відповідає атомарній точності) [32]. В цьому випадку встановлюється положення кантилевера, яке визначається за допомогою відбитого від нього лазерного променя.

Дифракційні методи використовуються в хімії твердого тіла для дослідження фазового складу та структури і деяких видів відхилень від ідеальності кристалічних матеріалів [33]. Вони засновані на дифракції різних типів хвиль на періодичній решітці кристалу. Кристал при цьому розглядають як набір атомних площин, від яких падаючий промінь відбивається із збереженням рівності кутів падіння і відбивання.

З усіх дифракційних методів найбільш поширеним (в першу чергу через свою доступність) є дифракція характеристичного рентгівського випромінювання.

Метод електронної дифракції реалізується частіше за все в мікроскопах, що просвічують матеріал, і в яких електрони лінійно розганяються до енергій 100–1000 кеВ [33]. До недоліків методу можна віднести меншу, ніж в рентгеноструктурному аналізі, точність визначення міжплощинних відстаней (відносна точність порядку 2–5 %); і локальність методу – при отриманні інтегральної інформації про зразок можливий деякий ступінь необачності оператора.

Метод дифракції теплових нейтронів значно менше, ніж рентгено- і електроннографія, застосовується для дослідження твердофазних матеріалів, що пов'язано з винятково високою вартістю використовуваного обладнання [33]. Основними джерелами нейтронів з необхідною енергією є ядерні реактори. Нейтронографічні експерименти здійснюються лише в невеликому числі ядерних центрів [33].

Найбільш точним і надійним методом визначення усередненого за об'ємом зразка елементного складу є розчинення зразка з наступним аналізом якісного і кількісного складу розчину стандартними методами аналітичної хімії [34]. В той же час специфіка задач хімії твердого тіла обумовлює необхідність дослідження не тільки усередненого елементного складу зразка в цілому, але й локального – усередненого за деяким малим елементом об'єму зразка.

Рентгеноспектральний кількісний аналіз заснований на залежності інтенсивності характеристичного випромінювання деякого елемента від концентрації його атомів в зразку [35]. При використанні для збудження характеристичного випромінювання сфокусованого електронного пучка рентгеноспектральний аналіз застосовують як метод дослідження локального елементного складу (рентгенолокальний аналіз) зразка. Кількісний рентгеноспектральний елементний аналіз проводять, головним чином, починаючи від натрію в періодичній системі елементів.

Зняття збудження після видалення одного з внутрішніх електронів атома може проходити не тільки шляхом вилучення кванту рентгенівського випромінювання, але і через випускання електрона (Оже-електронна) з відповідною кінетичною енергією. Набір таких значень кінетичної енергії є характеристичним для кожного елемента. Оже-електронна спектроскопія дає інформацію про елементний склад тонкого приповерхневого шару зразка [36]. Це часто приводить до необхідності досліджувати методом Оже-електронної спектроскопії тільки свіжі зрізи зразка, зроблені під вакуумом.

Інформація про хімічний стан атомів, що утворюють тверде тіло, часто виявляється необхідною для розуміння причин проявлення тих чи інших властивостей матеріалу і природи хімічних процесів, що з ним відбуваються. Ефективний ступінь окислення атома може бути

визначений на основі даних про енергії його зовнішніх електронних рівнів, найбільш поширеними і універсальними методами дослідження яких є: рентгенофотоелектронна спектроскопія і аналіз тонкої структури краю поглинання рентгенівського випромінювання (XANES) [37]. Універсальним методом дослідження координаційного оточення атомів є аналіз протяжної тонкої структури спектра поглинання рентгенівського випромінювання (EXAFS) [37]. Рентгеноструктурний аналіз в цьому випадку не дає необхідної інформації, оскільки дозволяє визначати тільки середні характеристики для системи. Виключно точна інформація як про ефективні степені окислення, так і про координаційне оточення атомів може бути отримана методом спектроскопії ядерного гамма-резонансу, або месбауерівською спектроскопією [37]. Проте застосування цього методу обмежено лише невеликим числом елементів.

Термоаналітичні методи слугують для дослідження хімічних реакцій, фазових та інших фізико-хімічних перетворень, що відбуваються під впливом тепла в хімічних з'єднаннях, або (у випадку багатоконпонентних систем) між окремими з'єднаннями [38]. Найбільш поширеними є вимірювання маси досліджуваного зразка при його нагріванні або охолодженні з постійною швидкістю – термогравіметричний аналіз (ТГ) – і різниці температури зразка і температури інертного зразка в умовах експерименту – диференціальний термічний аналіз (ДТА). Часто такі вимірювання проводять одночасно в одній установці, в якій також можна вимірювати і швидкість зміни маси зразка – диференціальна термогравіметрія (ДТТ).

Термоаналітичні методи використовуються для дослідження хімічних реакцій, фазових та інших фізико-хімічних перетворень, що відбуваються під впливом тепла в твердих тілах [39]. Розглянемо більш детально сучасні термоаналітичні методи, які використовуються для дослідження твердофазних систем.

Одним з напрямків розвитку стандартного обладнання для термічного аналізу є розробка приладів з більш високою верхньою границею температури. Прилади ДТА, що випускаються серійно, володіють на сьогодні верхньою межею вимірюваних температур до 1850 К [40], але є низка моделей, що застосовуються для температур порядку 2700 К [41]. Майже в усіх приладах для термічного аналізу, призначених для роботи при дуже великих температурах, використовуються оптичні методи вимірювання температури [42]. Вже в 1965 році Хестдеркс та ін. описали прилад ДТА для температур до 3900 К. Зразок та інертна речовина, розміщені у відповідні тиглі, нагрівалися в графітовій трубці. Температура визначалася електронним пірометром, який вимірював випромінювання циліндричних отворів в зразках. Пірометр

також використовувався і для контролю температури в печі. Різниця температур вимірювалась одним фотодіодом, на який по чергову направлялось випромінювання від зразка і від еталонного матеріалу.

Під час дослідження ітрієво-алюмінієвого гранату Каславським і Вехницьким було сконструйовано пристрій для оптичного диференційно-термічного аналізу (ОДТА), оскільки звичайний ДТА виявився незадовільним через нестабільність е. р. с. термопари вольфрам (дом. 3 %) реній-вольфрам (Re-25 %). Завдяки розробленому пристрою ОДТА була отримана крива ΔT за різницями сигналів двох оптичних пірометрів, один з яких вимірював температуру порожнини чорного тіла, яка містила зразок, а також слугував в якості еталонного, другий – вимірював температуру самого зразка.

Високотемпературний ДТА-прилад для вимірювань в діапазоні від 1200 до 2500 К описаний в роботі Кнотека та ін. Для визначення температур зразка і еталона використовувалися два пірометри. Розроблений диференційний підсилювач напруги згладжував і випрямляв вихідні сигнали двох пірометрів і таким чином формував сигнал різниці, проградуєований температурами плавлення п'яти чистих металів, в діапазоні від 1683 К (кремній) до 2133 К (хром). Точність у вказаному діапазоні була рівною 4...8 К.

Іншим напрямком розвитку термічних методів дослідження є розробка приладів, в яких хімічні та фазові зміни в системі при нагріванні фіксуються вимірюванням інших – нетеплових і негравіметричних – характеристик зразка. Однією з груп таких методів є акустичні. Такий, наприклад, метод термосоніметрії – відповідно до якого звук, що випромінюється речовиною, вимірюється як функція температури, яка змінюється за заданою програмою. Ще одним акустичним методом є термоакустометрія, яка заснована на впливі температури на пружність, а відповідно, і на швидкість звуку в матеріалі. Т. Ленвік, наприклад, використовував цей метод для дослідження фазового переходу $\alpha \rightarrow \beta$ -кварцу.

При термомеханічному аналізі деформація зразка змінюється в функції від температури. О. А. Гомозов та ін. застосували цей метод для визначення температури застигання тугоплавких карбідів, наприклад, карбідів урану і ніобію, за температурним коефіцієнтом повзучості. Ділатометри є добре відомими приладами для наукових і промислових цілей. Принцип роботи цих приладів заснований на визначенні зміни розмірів досліджуваних зразків під дією температури.

Вимірювання магнітних властивостей як функцій від температури (термомагнітометрія) також часто дають корисну інформацію. Багато магнітних перетворень хоча і відбуваються при відносно низьких температурах, можуть бути виявлені цим методом. Можливість

його використання при дуже високих температурах була доведена Е. Мюллером і Г. Гюнтеродтом, які розробили маятникові ваги для вимірювання магнітних параметрів при температурах до 2000 К.

Існують методи аналізу газів, що виділяються (ЕГА), і термічного аналізу виділення (ЕТА), які використовуються спільно з ДТА і ТГ. Фазові перетворення можуть бути виявлені і іншими способами, відповідно до яких термодинамічні параметри (е. р. с., тиск парів і т. п.) визначаються як функція від температури [43].

1.2 Огляд сучасних пристроїв для вимірювання температури

Основним напрямком розвитку сучасної техніки сенсорів є використання напівпровідникових матеріалів, інтегральної технології і розробка на їх основі мікроелектронних перетворювачів [4]. Зокрема перетворювачів температури, які є найважливішим різновидом сенсорів, оскільки більшість процесів, в тому числі і в повсякденному житті, регулюються температурою [44]. Проаналізуємо найбільш поширені сучасні засоби вимірювання температури.

Напівпровідникові датчики температури

Вплив температури на електрофізичні параметри напівпровідників, в основному, виявляється в зміні концентрації носіїв заряду, що приводить до відповідної зміни електричної провідності [45]. На цьому принципі працюють напівпровідникові терморезистори. В якості напівпровідникових датчиків температури також використовуються діоди і транзистори, де зміна концентрації носіїв заряду приводить до зміни струму, що протікає через напівпровідниковий прилад [45].

Відомий пристрій для багатоточкового вимірювання температури (рис. 1.3) [46], який використовується для температурних полів в силосах і бункерах, заповнених сипучими і займистими продуктами. Він містить одноперехідні транзистори 1, перші бази яких з'єднані з загальною шиною джерела живлення, а другі бази зв'язані зі змінними резисторами 3 і через діоди 4 з виходами блока комутації 5, емітери об'єднані з полюсом загального резистора 12. Генератор 2 виконаний на польових транзисторах 6 і 7, останній з яких має не менше двох затворів. Стік першого польового транзистора з'єднаний з одним із затворів другого польового транзистора і резистором 8. Другий затвор другого польового транзистора з'єднаний зі своїм витком і резистором 9. Витоки обох транзисторів з'єднані між собою через конденсатор 13, а з загальною шиною джерела живлення – через резистори 10 і 11.

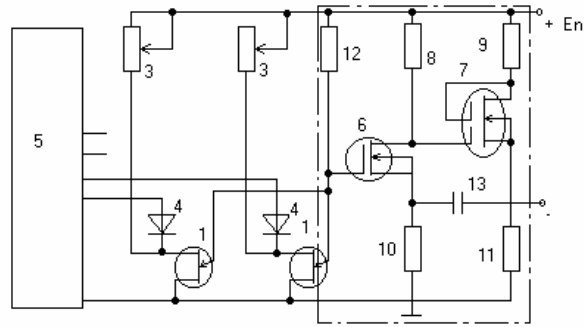


Рисунок 1.3 – Принципова схема пристрою для багатоточкового вимірювання температури

Принципова схема пристрою зображена на рис. 1.3. Новизною пристрою є те, що з метою підвищення точності вимірювання температури і збільшення швидкодії в нього введені напівпровідникові діоди за кількістю датчиків температури, які виконані на одноперехідних транзисторах, а другі бази одноперехідних транзисторів з'єднані із загальною шиною джерела живлення.

Електронний термосенсор [47] дає можливість вимірювати з високою точністю як абсолютне значення температури в точці, так і різницю температури в двох точках. Він складається з двох термочутливих транзисторів 1 і 2 однойменної структури, двох навантажувальних резисторів 3 і 4, включених в колекторні кола транзисторів 1 і 2, і двох змінних резисторів 5 і 6, призначених для калібрування температурних характеристик транзисторів 1 і 2 по двох параметрах: колекторній напрузі і струму бази. Наявність двох регулювань, що здійснюються за допомогою резисторів 5 і 6, дозволяє калібрувати термодатчик при двох значеннях температури транзисторів 1 і 2, зміщуючи їх температурні характеристики в двох точках. Схема термосенсора показана на рис. 1.4.

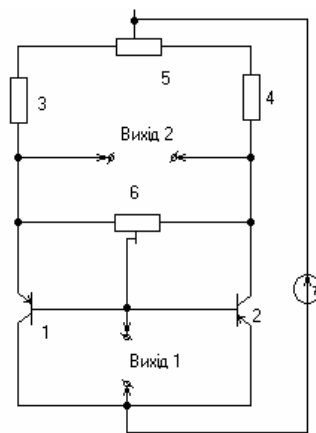


Рисунок 1.4 – Електрична схема електронного термосенсора

Новизною термосенсора є те, що з метою підвищення точності вимірювання в нього введений додатковий змінний резистор, крайні виводи якого з'єднані з другими виводами постійних резисторів, а його середній вивід з'єднаний з одним виводом джерела живлення, другий вивід якого з'єднаний безпосередньо з емітерами термочутливих транзисторів, бази яких з'єднані з середнім виводом першого змінного резистора, крайні виводи якого з'єднані з колекторами термочутливих транзисторів.

Наступний сенсор температури [48] складається з біполярного транзистора 1, польового транзистора 2, терморезистора 3 і першого і другого дифузійних резисторів 4 і 5. Польовий транзистор 2 ввімкнений за схемою витоків повторювача, між витком якого і загальною шиною живлення ввімкнений перший дифузійний резистор 4, затвор польового транзистора 2 підключений до колектора біполярного транзистора 1 і терморезистора 3, другий вивід терморезистора 3 з'єднаний із загальною шиною, стік польового транзистора 2 пов'язаний з базою біполярного транзистора 1 і одним виводом другого джерела живлення. Емітер біполярного транзистора 1 через третій дифузійний резистор 6 з'єднаний з полюсом джерела живлення. Схема сенсора наведена на рис. 1.5.

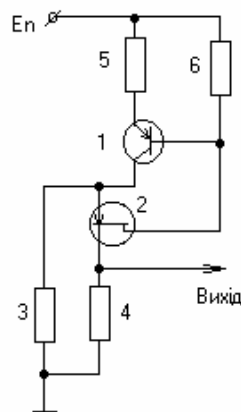


Рисунок 1.5 – Принципова електрична схема сенсора температури

Новизною сенсора є те, що в нього введений третій дифузійний резистор, при цьому колектор біполярного і затвор польового транзисторів через терморезистор підключені до загальної шини, з якою через перший дифузійний резистор з'єднаний витік польового транзистора, стік якого і база біполярного транзистора підключені до шини живлення через другий дифузійний резистор, а третій дифузійний резистор включений між емітером біполярного транзистора і шиною живлення.

Напівпровідниковий вимірювач температури, схема якого показана на рис. 1.6 [49], застосовується для вимірювання температури в діапазоні 200–425 К. Він містить перший 1 і другий 2 узгоджені транзистори, виконані в одному кристалі, перший 3, другий 4 і третій 5 резистори, перший диференційний підсилювач 6, вимірювач 7 напруги і джерело 8 напруги. Вимірювач температури містить також другий диференційний підсилювач 9, третій транзистор 10, що має відносно узгодженої пари зворотній тип провідності, і четвертий 11, п'ятий 12 шостий 13 резистори.

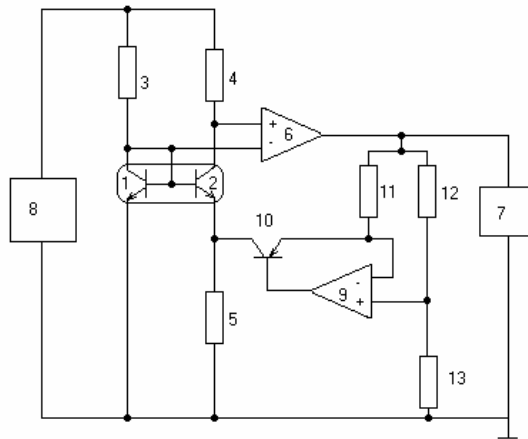


Рисунок 1.6 – Напівпровідниковий вимірювач температури

Новизною пристрою є те, що з метою підвищення чутливості вимірювача температури в нього введені другий диференційний підсилювач, третій транзистор, що має відносно першого і другого транзистора зворотній тип провідності, четвертий, п'ятий і шостий резистори. Перші виводи четвертого і п'ятого резисторів з'єднані з виходом диференційного підсилювача, другий вивід четвертого резистора з'єднаний з емітером третього транзистора і інвертувальним входом другого диференційного підсилювача, неінвертувальний вхід якого з'єднаний з другим виводом п'ятого резистора і першим виводом шостого резистора, другий вивід якого з'єднаний із загальною шиною. Вихід другого диференційного підсилювача з'єднаний з базою третього транзистора, колектор якого з'єднаний з емітером першого транзистора.

Датчики температури на основі діодів і транзисторів

У датчиках температури на основі діодів і транзисторів використовують залежність параметрів р-п-переходу в напівпровіднику від температури.

Історично першим температурозалежним параметром був зворотний струм діодів і транзисторів. Значення струму росте з темпера-

турою за експоненціальним законом із швидкістю порядку $10 \text{ \%}/\text{K}^{-1}$. Проте діапазон температур, в межах яких можливо використання зворотних струмів, вельми обмежений. Верхня температурна межа застосування визначається температурою їх теплового пробою.

Найбільшого поширення набуло використання прямих параметрів діодів і транзисторів [50]. Їх істотними перевагами перед зворотними є лінійність температурної залежності, широкий діапазон робочих температур, висока стабільність. Найчастіше для вимірювання температури використовується пряма напруга на р-п-переході при майже постійному струмі емітера. Зміна прямої напруги складає близько $2,5 \text{ мВ}/\text{K}^{-1}$. При підвищенні температури транзисторів р-п-р-типу напруга емітер-база з області позитивних значень переходить в область негативних.

Так, наприклад, датчик TS-560, розроблений Фізико-технічним інститутом ім. А. Ф. Іоффе РАН (м. Санкт-Петербург), є напівпровідниковим діодом на основі арсеніду галію. Діапазон вимірювання такого датчика (4,2–500) К, основна погрішність 0,1 %, чутливість $2,3 \text{ мВ}/\text{K}$, габаритні розміри 33 мм [50].

Відомі випадки використання як температурозалежного параметра коефіцієнта підсилення за струмом на низьких і високих частотах [51]. Проте невисока чутливість коефіцієнта підсилення до температури і його залежність від передісторії, а також необхідність індивідуального градуювання у всьому діапазоні робочих температур обмежують застосування цього параметра при створенні термодатчиків.

На основі транзисторів, емітерний перехід яких включений в одне з плечей моста, створені термодатчики типу ТЕТ-1, ТЕТ-2 [44]. Перший тип використовується для вимірювання температури в польових умовах в діапазоні $-10 \dots +40 \text{ }^\circ\text{C}$ з основною погрішністю не більше 1 К, другий – в діапазоні $-40 \dots +80 \text{ }^\circ\text{C}$ з погрішністю не більше $0,3 \dots 2 \text{ К}$.

Температурні межі застосування транзисторів в термодатчиках значно ширші, ніж при використанні транзисторів за прямим призначенням. Обмеження застосування з боку високих температур настає унаслідок переходу домішкового напівпровідника у власний, зменшення напруги пробою і підвищення генерації носіїв в базовій області при від'ємних напругах. Застосування при низьких температурах визначається зменшенням концентрації основних носіїв через дезактивації легуючих домішок і зменшення коефіцієнта підсилення за струмом.

Основним недоліком розглянутих термодатчиків є складність отримання їх номінальної статистичної характеристики через розкид основних параметрів транзисторів: коефіцієнта підсилення за

струмом, опорю базової області, струму витоку і ін. Аналіз і оцінка впливу розкиду вказаних параметрів на точність вимірювання температури при використанні номінальної статистичної характеристики, виконаний в [45], показали, що для прямих параметрів транзисторів з градуванням при одній температурі погрішність вимірювання в схемі із загальним емітером – не більше 2 і 50 % при коефіцієнті підсилення за струмом $\beta \leq 30$ і $\beta \geq 200$ відповідно.

Датчики температури на основі терморезисторів

Найбільш широкого поширення набули датчики на основі терморезисторів [44]. Принцип терморезистивного перетворення заснований на температурній залежності активного опору металів, сплавів і напівпровідників, що володіють високою відтворюваністю і достатньою стабільністю по відношенню до чинників, що дестабілізують. Температурну чутливість термометричного матеріалу прийнято характеризувати температурним коефіцієнтом опору (ТКС).

Проте термодатчики такого типу володіють низкою недоліків. Температурна залежність опору носить нелінійний характер, оскільки величина ТКС в робочому діапазоні температур змінює свою величину, іноді навіть на декілька порядків. Технологія виготовлення чутливих елементів не дозволяє набувати номінального значення опорів навіть для одного типа з розкидом менше 10...20 %. Крім того, значення температурного коефіцієнта опору терморезисторів однієї конфігурації можуть відрізнятись майже в два рази [50], унаслідок чого відсутня їх взаємозамінюваність.

Але основним недоліком термометрів цього типу є те, що вони, не дивлячись на проведення в процесі виготовлення штучного старіння, володіють низькою тимчасовою стабільністю і відтворюваністю.

Плівкові напівпровідникові датчики температури

Поліпшення характеристик напівпровідникових датчиків температури і спрощення їх конструкції може бути досягнуте при використанні чутливих елементів, виготовлених з тонких плівок напівпровідника, нанесеного на напівпровідникову або діелектричну підкладку. Виготовлення таких датчиків здійснюється масовими методами планарної технології, які забезпечують отримання значень номінальних опорів з достатньо високою точністю і, крім того, дозволяють використовувати при виготовленні лазерні методи підгонки номінальних опорів.

Основним недоліком датчиків на основі автоепітаксіальних структур «кремній на кремнії», а також на основі чутливих елементів з дифузійними кремнієвими терморезисторами є низька верхня межа робочих температур, що обумовлено різким погіршенням ізолюючих властивостей р-п переходу при температурах більш 410–430 К [51].

Перетворювач температури в частоту [52] використовується у вимірювальній техніці, в тому числі і в системах керування та контролю з цифровою індикацією. Перетворювач містить опір навантаження, тиристор 2, перший конденсатор 3, термочутливий елемент 4, перший 5 і другий 6 резистори, конденсатор 7, який виконаний змінним, джерело 8 живлення. Метою винаходу було підвищення ефективності за рахунок окремого регулювання частоти і амплітуди сигналів. Для цього між катодом тиристора 2 і виводом змінного резистора 6 ввімкнений конденсатор 7. Схема пристрою зображена на рис. 1.7.

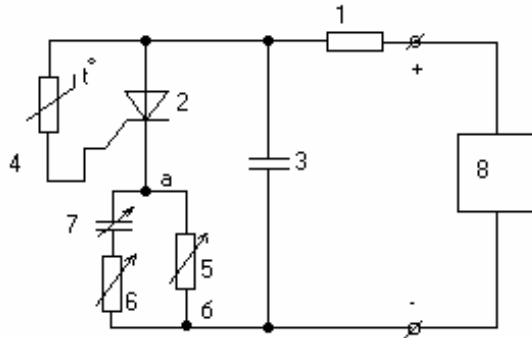


Рисунок 1.7 – Схема перетворювача температури

Перетворювач температури в частоту містить в собі генератор імпульсів, який складається з послідовно з'єднаних тиристора і першого змінного резистора. Паралельно до них включений конденсатор, терморезистор, підключений одним виводом до керувального електрода тиристора, а іншим – до його анода, який через опір навантаження зв'язаний з полюсом джерела живлення. Другий його полюс підключений до другого виходу першого змінного резистора і першому виводу другого змінного резистора.

Новизною пристрою є те, що в нього введений другий конденсатор, перша обкладка якого з'єднана з другим виводом другого змінного резистора, а друга обкладка – з катодом тиристора.

Для вимірювання температури різних середовищ і тіл в складі багатоканальних вимірювальних систем і автоматичних установках використовують перетворювач температури в частоту [53] (рис. 1.8). Принцип дії пристрою полягає в тому, що при проходженні струму через терморезистор 11 на ньому виникає падіння напруги, яке залежить як від струму, так і від вимірюваної температури. Величина струму регулюється джерелом 12 стабільного струму. Цим досягається залежність падіння напруги на терморезисторі 11 від температури. Сигнал з терморезистора 11 через дільник 8 напруги подається на затвор транзистора 2 і регулює частоту імпульсів генератора 1. З підвищенням температури терморезистора 11 падіння напруги на нього

зменшується, що приводить до збільшення частоти вихідних імпульсів генератора 1. Відношення величин опорів резисторів 9 і 10 дільника напруги 8 задає зміщення на затворі транзистора 2.

Новизною перетворювача є те, що з метою підвищення точності перетворення в нього введене джерело стабільного струму, а генератор імпульсів виконаний на аналізі керованого інжекційно-польового транзистора. Дільник напруги виконаний у вигляді двох резисторів. Другий затвор аналога керованого інжекційно-польового транзистора з'єднаний з виходом дільника напруги, одне плече якого з'єднане з плюсом джерела живлення, друге – з точкою з'єднання перших виводів джерела стабільного струму і терморезистора, а другі виводи якого з'єднані, відповідно, з плюсом і мінусом джерела живлення.

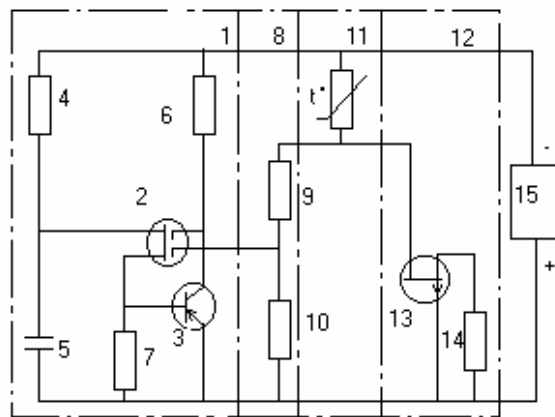


Рисунок 1.8 – Електрична схема перетворювача температури в частоту

Проаналізуємо датчики температури, що базуються на транзисторних аналогах негатронів (АН) [54]. В якості чутливого елементу використовуються зазвичай терморезистори або діоди. Схеми каскадних аналогів негатронів показані на рис. 1.9.

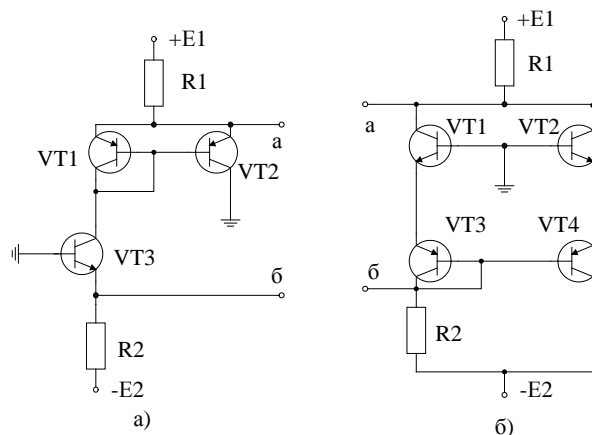


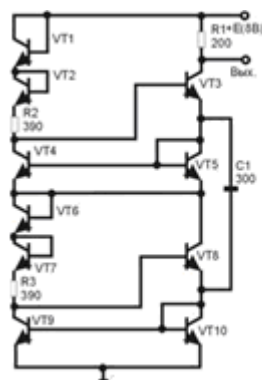
Рисунок 1.9 – Схеми каскадних аналогів негатронів з відбивачами струму

У випадку використання резистивного сенсора його можна вві-
мкнути замість резистора, що відповідає за живлення транзисторів АН
за постійним струмом, якщо на АН побудований ємнісний автогене-
ратор (до клем а-б під'єднаємо конденсатор). Наприклад, при викори-
станні АН, показаних на рис. 1.9, терморезистор вмикається замість
резистора R2. При використанні діодів в якості сенсорів один діод або
послідовне їх коло вмикаються послідовно з тим самим резистором.

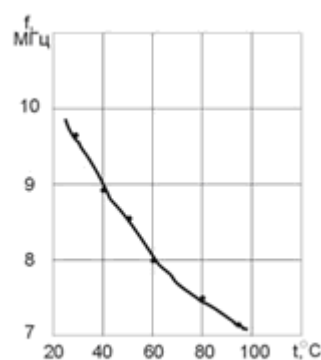
На рис. 1.10 показано приклад датчика температури з діодними
сенсорами VT1, VT2, VT6, VT7. Тут струм, що протікає через транзи-
стори, при $R_2 = R_3$ буде

$$I = \frac{0,5 \cdot E - 4 \cdot U_{eб}}{R_2} . \quad (1.1)$$

Оскільки напруга $U_{eб}$ з ростом температури зменшується на
 $2,2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$, то даний струм зростає, змінюється ВАХ між клемми а-б і,
відповідно, частота автогенератора [55]. З наведеного на рис. 8б гра-
фіку можна визначити, що чутливість датчика складає $-0,35 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Якщо в АН використовувати МДН-транзистори, параметри
яких сильно залежать від температури, то ці транзистори, що входять
в АН, одночасно можуть використовуватись і сенсорами. Приклад та-
кого датчика температури показано на рис. 1.11. Чутливість складає
 $+0,73 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. При використанні інших схем АН графік залежності час-
тот від температури не завжди є лінійним. Зрозуміло, що в якості сен-
сора може використовуватись і сегнетоконденсатор. Проте в твердоті-
льному виконанні найпростіше всього виготовити датчик температури
з використанням діодів.



(а)



(б)

Рисунок 1.10 – Схема датчика температури (а) і графік залежності частоти
від температури (б)

ЛІТЕРАТУРА

1. Гоц Н. Є. Сучасні проблеми інформаційної підтримки оптичної пірометрії / Н. Є. Гоц // Актуальні проблеми економіки № 10. – 2006. – С. 45–51.
2. Аш Жорж. Датчики измерительных систем. В 2-х книгах / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – 424 с.
3. Како Н. Датчики и микро-ЭВМ / Н. Како, Я. Ямонэ. – Л. : Энергоатомиздат, 1986 – 129 с.
4. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
5. Викулин Иван Михайлович. Полупроводниковые датчики / В. И. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Сов. Радио, 1975. – 104 с.
6. Новицкий В. П. Цифровые приборы с частотными датчиками / В. П. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1970. – 423 с.
7. Лайнс Майкл. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / М. Лайнс, А. Глас. – М. : Мир, 1981. – 603 с.
8. Берман Лев Соломонович. Моделирование вольт-амперных характеристик полевого транзистора с сегнетоэлектрическим изолятором / Л. С. Берман // ФТП. – 2001. – № 35(11). – С. 1391–1395.
9. Гаврилова Н. Д. Пироэлектричество / Н. Д. Гаврилова, М. Н. Данилычева, В. К. Новик. – М. : Сов. рад., 1989. – 154 с.
10. Сонин Анатолий Степанович. Введение в сегнетоэлектричество / А. С. Сонин, Б. А. Струков. – М. : Высшая школа, 1970. – 162 с.
11. Пироэффект в тригидроселените лития : материалы семинара МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского / [Н. Р. Иванов, С. Д. Пельц, Л. А. Шувалов, Ю. А. Чингина]. – М. : Знание, 1972. – С. 111–113.
12. Watanabe Y. Memory Retention and Switching Speed of Ferroelectric Field Effect in (Pb, La)(Ti, Zr)O₃/La₂CuO₄:Sr Heterostructure / Y. Watanabe, M. Tanamura, Y. Matsumoto // Japan. J. Appl. Phys. – 1995. – № 35, pt. 1 (1564). – 1995. – P. 78–89.
13. Rep D. B. A. Equivalent-circuit modelling of ferroelectric switching devices / D. B. A. Rep, M. W. Prins // J. Appl. Phys. – 1999. – № 85 (7923). – P. 81–98.
14. Modeling ferroelectric capacitor switching with asymmetric nonperiodic input signals and arbitrary initial conditions / [S. L. Miller,

J. R. Schwank, R. D. Nasby, M. S. Rodgers] // J. Appl. Phys. – 1991. – № 70(2849). – P. 68–74.

15. Болванович Эдуард Иосифович. Полупроводниковые пленки и миниатюрные измерительные преобразователи / Э. И. Болванович. – Мн. : Наука и техника, 1981. – 168 с.

16. Новик В. К. Пироэлектрические преобразователи / В. К. Новик, Н. Д. Гаврилова, Н. Б. Фельдман. – М. : Советское радио, 1979. – 176 с.

17. Сигов Александр Сергеевич. Сегнетоэлектрические тонкие пленки в микроэлектронике / А. С. Сигов // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 10. – С. 83–91.

18. Струков Борис Анатольевич. Пироэлектрические материалы: свойства и применения / Б. А. Струков // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 5. – С. 96–104.

19. Измерительные преобразователи на основе комбинированных твердотельных структур / [В. Л. Костенко, Е. Я. Швец, Е. Н. Киселев, Н. А. Омельчук]. – Запорожье : Издательство ЗГИА, 2001. – 101 с.

20. Осадчук Владимир Степанович. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / В. С. Осадчук. – К. : Вища школа, 1987. – 155 с.

21. Осадчук Олександр Володимирович. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 303 с.

22. Киселев Егор Николаевич. Дистанционное измерение тепловых потоков малой мощности / Е. Н. Киселев, В. Л. Костенко // Состояние, проблемы и направления развития производства цветных металлов в Украине. – Запорожье : ЗГИА, 2001. – С. 352–357.

23. Вимірювання температури: теорія та практика / [Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник] // Львів : Бескід-Біт. – 2006. – 580 с.

24. Енциклопедія термометрії / [Я. Т. Луцик, Л. К. Буняк, Ю. К. Рудавський, Б. І. Стадник] // Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка». – 2003. – 428 с.

25. Уэндлант Уэсли. Термические методы анализа / У. Уэндлант // – М. : Изд-во Мир, 1978. – 527 с.

26. Кнотько А. В. Химия твердого тела / А. В. Кнотько, И. А. Пресняков, Ю. Д. Третьяков. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
27. Жуковский Валентин Семенович. Термодинамика и кинетика твердофазных реакций / В. С. Жуковский, А. Н. Петров. – Свердловск : Уральский государственный университет, 1987. – 168 с.
28. Кларк Эшли Роберт. Микроскопические методы исследования материалов / Э. Р. Кларк, К. Н. Эберхардт. – М. : Техносфера, 2007. – 376 с.
29. Давидович Г. Н. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ : Кн. 2. ; пер. с англ. / Г. Н. Давидович, А. Г. Богданов. – М. : МИР, 1984. – 303 с.
30. Введение в физику поверхности : пер. с англ. / [Оура Кендзиро, В.Г. Лифшиц, А. А. Саранин, и др.]. – М. : Наука, 2006. – 490 с.
31. Панов Владимир Иванович. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия поверхности / В. И. Панов // УФН. – 1988. – № 1, – т. 155. – С. 155–158.
32. Эдельман Валерий Самсонович. Развитие сканирующей туннельной и силовой микроскопии / Э. В. Самсонович // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 1. – С. 24–42.
33. Фарбер В. М. Дифракционные методы анализа : учебное пособие / В. М. Фарбер, А. А. Архангельская. – Екатеринбург : ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ», 2004. – 107 с.
34. Золотов Юрий Александрович. Основы аналитической химии : Кн. 2. Методы химического анализа / Ю. А. Золотов. – М. : Высшая школа, 2002. – 361 с.
35. Физические основы рентгеноспектрального микроанализа: сведения о методах рентгеноспектрального микроанализа // ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» при ФТИ им. А. Ф. Иоффе. – СПб., 2010. – 14 с.
36. Еловигов Сергей Сергеевич. Оже-электронная спектроскопия / С. С. Еловигов // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – № 2, т. 7. – С. 82–88.
37. X-ray Absorption: Principles, Applications, Techniques of EXAFS, SEXAFS, and XANES / D. C. Koningsberger, R. Prins // Chemical Analysis. – 1988. – Vol. 92. – 688 p. – ISBN-10: 0471875473.

38. Альмяшев Вячеслав Исакович. Термические методы анализа : учебное пособие / В. И. Альмяшев, В. В. Гусаров. – СПб. : СПбГЭТУ(ЛЭТИ), 1999. – 40 с. – ISBN: 5-7629-0284-6.

39. Егунов Виктор Павлович. Введение в термический анализ : моногр. / В. П. Егунов. – Самара, 1996. – 270 с.

40. Дифференциальный термический анализ (ДТА) – LABSYS evo [Электронный ресурс] / Datasheet for LABSYS evo. – Режим доступа: http://www.setaram.com/traitement/export_doc.php?doc=/files/documents/LABSYS%20EVO-0410.pdf

41. ДТА РТ 1600 [Электронный ресурс] / Дифференциальный термический анализатор / Термический анализ / Сайт компании «Лабинструментс». – Режим доступа: http://www.labinstruments.ru/thermal_analysis/dif-term/

42. Шестак Ярослав. Теория термического анализа : физико-химические свойства твердых неорганических веществ ; пер. с англ. / Я. Шестак. – М. : Мир, 1987. – 456 с.

43. Третьяков Юрий Дмитриевич. Твердофазные реакции / Ю. Д. Третьяков. – М. : Химия, 1978. – 360 с.

44. Шашков А. Г. Терморезисторы і їх застосування / А. Г. Шашков // – К. : Наука, 1997. – 156 с.

45. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : В 2-х книгах. Кн. 1 . Пер. с англ. 2-е перераб. доп. изд. – М. : Мир, 1984. – 456 с.

46. Авторское свидетельство СССР № 1534334, (51) МКИ G 01 К 7/00. Устройство для многоточкового измерения температуры / А. С. Щеголевых, А. М. Бритиков; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности. – № 4327373/24-10; заявл. 17.11.87; опубл. 07.01.90, Бюл. № 1.

47. Авторское свидетельство СССР № 1597596, (51)5 МКИ G 01 К 7/00. Электронный термодатчик / А. А. Соломашкин, П. М. Черейский; заявитель и патентообладатель Государственный всесоюзный научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка. – № 4365715/24-10; заявл. 21.01.88; опубл. 07.10.90, Бюл. № 37.

48. Авторское свидетельство СССР № 1714390, (51) МКИ G 01 К 7/14. Датчик температуры / А. С. Щеголевых; заявитель и патентообладатель Всесоюзное научно-производственное объединение

«Комбикорм». – № 4780643/10; заявл. 10.01.90; опубл. 23.02.92, Бюл. № 7.

49. Авторское свидетельство СССР № 1606876, (51)5 МКИ G 01 K 7/00. Полупроводниковый измеритель температуры / Э. А. Багиров, Э. М. Бромберг; заявитель и патентообладатель Азербайджанское научно-производственное объединение «Нефтегаз-автомат». – № 4349935/24-10; заявл. 28.12.87; опубл. 15.11.90, Бюл. № 42.

50. Фогельсон И. Б. Транзисторные термодатчики / И. Б. Фогельсон // – М. : Советское радио, 1972.

51. Папков В. С. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе / В. С. Папков // – М. : Энергия, 1979. – 351 с.

52. Авторское свидетельство СССР № 1352245, (51) МКИ G 01 K 7/14. Преобразователь температуры в частоту / Х. Х. Девликамов, А. Н. Комов, О. К. Переверзева, В. И. Чепурнов; заявитель и патентообладатель Куйбышевский государственный университет. – № 3990556/24-10; заявл. 17.12.85; опубл. 15.11.87, Бюл. № 42.

53. Авторское свидетельство СССР № 1538061, (51)5 МКИ G 01 K 7/14. Преобразователь температуры в частоту / В. В. Попивненко; заявитель и патентообладатель Белорусский технологический институт им. С. М. Кирова. – № 4274884/24-10; заявл. 01.07.87; опубл. 23.01.90, Бюл. № 3.

54. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин: учеб. пособ. / [О. А. Агеев, В. М. Мамиконова, В. В. Петров, и др.] // Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с.

55. Полупроводниковые трансдюсеры температуры с частотным выходом на аналогах негatrona / [Б. Г. Коноплев, О. Н. Негоденко, С. Г. Кошелев, Е. А. Рындин] // Труды НТК Датчик-95. – Крым, 1995. – С. 342.

56. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький // – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 195 с.

57. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів, транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця. 1999. – 275с.

58. Журавлев Л. Г. Физические методы исследования металлов и сплавов / Л. Г. Журавлев, В. И. Филатов. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 157 с.

59. Иванова Г. М. Теплотехнические измерения и приборы : учебник для вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – 2-е издание, перераб. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 460 с., ил. – ISBN 5-7046-1046-3.

60. Патент України на корисну модель № 33399 А, (51) МПК G01N 25/02 (2006.01), G01N 25/20 (2006.01). Спосіб термічного аналізу / В. Д. Александров, О. О. Баранніков; заявник і патентовласник Александров Валерій Дмитрович, Баранніков Олександр Олександрович. – № 99020930; заявл. 18.02.1999; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1.

61. Авторское свидетельство СССР № 1340337, (51) МПК G 01 N 25/02. Устройство для дифференциально-термического анализа / А. В. Золотухин, Ю. А. Краковецкий-Кочержинский; заявник і патентовласник Институт сверхтвёрдых материалов АН УССР. – № 3873216/24-25; опубл. 27.03.85.

62. Патент України на корисну модель № 46516, (51) МПК G01N 25/02 (2006.01). Установка для визначень фазових перетворень / М. В. Стасевич, В. Д. Александров, В. О. Топчій; заявник і патентовласник Стасевич Марина Валентинівна. – № u200906910; заявл. 02.07.2009; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.

63. Аналіз методів вимірювання температури на основі піроелектриків / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. М. Ільченко] / Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Современные научные достижения – 2008» / Том 17 / Технические науки / Электротехника и радиоэлектроника / Przemysl. Nauka i studia, 2008. – С. 3–11.

64. Осадчук В. С. Аналіз сучасних засобів вимірювання температури / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан / Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальные проблемы современных наук-2009» / Номер 22 / Технические науки / Электротехника и радиоэлектроника / Przemysl. Nauka i studia, 2009. – С. 40–50.

65. Cooper G. Minimum detectable power of pyroelectric thermal receiver/ G. Cooper // Rev. Sci. Instrum. – №33. – 1962. – P. 92–95.

66. Пат. 19727447 Германия, МКИ Н 01 L 37/00. Infrared radiation sensitive device. E. g. pyroelectric IR sensor / Ito Satoru (Япо-

ния); Murata manufacturing Co (Япония). – N1027447; Заявл. 26.09.97; Опубл. 19.09.2000. – 15 с.

67. Пат. 6121615 США, МКИ G 01 J 5/00. Infrared radiation sensitive device / Ito Satoru (Япония); Murata manufacturing Co (Япония). – N926304; Заявл. 27.06.95; Опубл. 12.03.98. – 16 с.

68. Пат. 19753769 Германия, МКИ G 01 J 5/34. Pyroelectric temperature sensor for infrared radiation measurement / Dibben Uwe; Philips Patentverwaltung (Германия). – N1053769; Заявл. 04.12.97; Опубл. 10.06.99. – 5 с.

69. Пат. 6114698 США, МКИ G 01 J 5/10. Domain engineered ferroelectric optical radiation detector / Lehman J. H., Aust J. A. (США); US Commerce (США). – N0011656; Заявл. 31.01.97; Опубл. 05.09.2000. – 15 с.

70. Пат. 2002017607 США, МКИ G 01 J 5/00. Domain engineered ferroelectric optical radiation detector having multiple domain regions for acoustic dampening / Lehman J. H., Aust J. A. (США). – N0849959; Заявл. 04.05.2001; Опубл. 14.02.2002. – 19 с.

71. Патент Німеччини № 4221037, МПК G 01 J 5/06. Pyroelectric or thin film bolometr thermal radiation sensor – has photolithographically-structurable layer with infrared absorption characteristics, several microns in thickness on radiation-receiving surface sensor over silicon substrate / Plotz F. et. al. (Німеччина); заявник і патентовласник Heimann Optoelectronic (Німеччина). – N221037; заявл. 26.06.92; опубл. 05.01.94. – 5 с.

72. Измерительные преобразователи на основе комбинированных твердотельных структур / [В. Л. Костенко, Е. Я. Швец, Е. Н. Киселев, Н. А. Омельчук]. – Запорожье : Издательство ЗГИА, 2001. – 101 с.

73. Патент Німеччини № 20001058861, МПК H 01 L 27/146. Pyroelectric image sensor and method for producing the same / Kolb S. et. al. (Німеччина); заявник і патентовласник Siemens AG, Infineon Technologies AG (Німеччина). – N04374; заявл. 21.11.2001; опубл. 30.05.2002. – 24 с.

74. MEMS Infrared sensors catalog / Thermometrics Global Business. – Edison Thermometrics New Jersey, 2001. – 34 с.

75. Пат. 20001058861 Германия, МКИ H 01 L 27/146. Pyroelectric image sensor and method for producing the same / Kolb S. et. al. (Герма-

ния); Siemens AG, Infineon Technologies AG (Германия). – N04374; Заявл. 21.11.2001; Опубл. 30.05.2002. – 24 с.

76. Пат. 5860741 США, МКИ G 01 J 05/08, G 01 J 05/06, G 01 J 05/62. Absolute radiation thermometer / Huang J. et. al. (Тайвань); Opto Tech Corp. (Тайвань). – N73864; Заявл. 30.10.96; Опубл. 19.01.99. – 19 с.

77. Костенко В. Л. Особенности построения корпоративных сетей интеллектуальных датчиков параметров технологических процессов / Швец Е. Я., Максименюк А. В., Киселев Е. Н. / *Металлургия (сб. научных трудов)*; отв. ред. Н. Ф. Колесник, Г. А. Колобов – Запорожье : ЗГИА, 2003. – Выпуск 8. – С. 146–148.

78. Pyroelectric infrared sensor & sensor module. Catalog № S21E-5. – Tokyo: Murata Manufacturing Co., Ltd., International Division, 2002. – 18 с.

79. Пироэффект в тригидроселените лития / [Иванов Н. Р., Пельц С. Д., Шувалов Л. А., Чингина Ю. А.] // *Материалы семинара МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, май, 1972. М. : О-во «Знание», 1972. – С. 111–113.*

80. Методы обнаружения и исследования пироэффекта / [Новик В. К., Гаврилова Н. Д., Ройтберг М. Б., Рабинович А. З.] // – «Электронная техника. Серия 14. Материалы», 1969, выпуск 1. – С. 167–173.

81. Кейзан Б. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений / Б. Кейзан // – М.: Мир. – 1980. – С. 12–88.

82. Pyroelectric detectors. Single element detectors. Basic line. – Dresden : Infra Tech GmbH, 1999. – 9 с.

83. Advanced sensors technologies. Products catalog. – Fremont : PerkinElmira Optoelectronics, 2002. – 50 с.

84. Розробка мікроелектронних перетворювачів теплової потужності у частоту на основі транзисторних структур з від'ємним опором / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. М. Ільченко] // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 1. – С. 133–139.*

85. Розробка радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів температури на основі структури метал–сегнетоелектрик–напівпровідник / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан,

О. М. Ільченко] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №3 – С. 94–97. – ISSN 1997-9266.

86. Осадчук В. С. Перетворювач температури на основі IGBT-VJT структури з від'ємним опором [Електронний ресурс] / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2009. – № 2. – С. 1–8. – Режим доступу: <http://nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-2/2009-2.htm>

87. Осадчук В. С. Радіовимірвальний перетворювач температури [Електронний ресурс] / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2010. – № 1. – С. 1–9. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2010_1/2010-1.htm

88. Осадчук В. С. Мікроелектронний перетворювач температури на основі піроелектричного конденсатора / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 103–108. – ISSN 1997-9266.

89. Патент України на корисну модель № 31510, (51) МПК (2006) G 01K 7/00. Мікроелектронний сенсор температури / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. М. Ільченко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u20014163; заявл. 17.12.2007; опубл. 10.04.2008, Бюл. № 7.

90. Патент України на корисну модель № 31170, (51) МПК (2006) G 01K 7/00. Пристрій для виміру температури / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. М. Ільченко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200714154; заявл. 17.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6.

91. Патент України на корисну модель № 41856, (51) МПК (2009) G 01K 7/00. Мікроелектронний пристрій для вимірювання температури з активним індуктивним піроелектричним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200900483; заявл. 23.01.2009; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.

92. Патент України на винахід № 87585, (51) МПК (2006.01) G 01J 5/58. Мікроелектронний пристрій для вимірювання теплової потужності / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. М. Ільченко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний

університет. – № а200712838; заявл. 19.11.2007; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14.

93. Патент України на корисну модель № 42780, (51) МПК (2009) G 01K 7/00. Мікроелектронний піроелектричний сенсор температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200815042; заявл. 26.12.2008; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14.

94. Патент України на корисну модель № 31114, (51) МПК (2006.01) G 01J 5/58. Мікроелектронний сенсор теплової потужності / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. М. Ільченко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200713424; заявл. 03.12.2007; опубл. 25.03.2008. Бюл. № 6.

95. Патент України на винахід № 90032, (51) МПК (2006.01) G01 J 1/44. Транзисторний піроелектричний температурний сенсор / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, С. В. Барабан; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № а200806900; заявл. 19.05.2008; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6.

96. Барабан С. В. Радіовимірювальний перетворювач температури / С. В. Барабан, О. В. Осадчук, В. С. Осадчук // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009)», 8–10 жовтня 2009 р.: тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – С. 60.

97. Осадчук В. С. Частотний вимірювальний перетворювач інфрачервоного випромінювання / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан // Фотоніка-ODS 2010 : V Міжнародна конференція з оптико електронних інформаційних технологій, 28–30 вересня 2010 р. : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 199.

98. Барабан Сергій Володимирович. Мікроелектронний перетворювач температури на основі піроелектричної структури / С.В. Барабан // Матеріали XV Міжнародного молодіжного форуму «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 18–20 квітня 2011 р. : тези доповідей. – Харків : ХНУРЕ, 2011. – 372 с.

99. Меден Арун. Физика и применение аморфных полупроводников / А. Меден, М. Шо. – М. : Мир, 1991. – 549 с.

100. Корзанов В. С. Термогравиметрия: учебное пособие для студентов 3 курса химического факультета / Пермский университет // В. С. Корзанов, М. Г. Котомцева, Р. И. Юнусов. – Пермь, 2007. – 71 с.
101. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 3-е, перераб. и доп. / И. П. Степаненко. – М. : Энергия, 1973. – 608 с.
102. Antognetti Paolo. Semiconductor devices modeling with SPICE / P. Antognetti, G. Massobrio. – McGraw-Hill, Inc. – New York, 1988. – 391 p.
103. Пат. 4024560 США, МКИ Н 01 L 29/78. Pyroelectric-field effect electromagnetic radiation detector / Robert C. Miller, Shu-Yau Wu; Заявл. 04.09.1975; Оpubл. 17.03.1977. – 16 с.
104. Пат. 3426255 США, МКИ Н 01 L 11/14. Field effect transistor with a ferroelectric control gate layer / Walter Heywahn Munich; Заявл. 01.07.1965; Оpubл. 29.06.1966. – 16 с.
105. Science and technology of integrated ferroelectrics / Selected papers from eleven years of the proceedings of the international symposium on integrated ferroelectrics / Carlos Paz de Araujo, Orlando Auciello, Ramamoorthy Ramesh, George W. Taylor / Gordon and Breach Science Publishers, 2000. – 681 p.
106. Пат. 31065 Україна, МПК G 01J 5/58. Пристрій для вимірювання теплової потужності / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Барабан С. В., Ільченко О. М. – № 12831; Заявл. 19.11.2007; Оpubл. 25.03.2008, Бюл. № 6. – 6 с.
107. Ferroelectric Thin Films / NATO ASI Series (E), 1995. – V. 284.
108. Пат. 0108385 США, МКИ G 01 J 5/00. Pyroelectric sensor / Joseph V. Mantese; Delphi Technology. – № 05100; Заявл. 20.02.2004; Оpubл. 17.03.2007. – 16 с.
109. Пат. 88814 Україна, МПК G 01K 7/00. Мікроелектронний пристрій для вимірювання температури / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Барабан С. В., Ільченко О. М. – № 14880; Заявл. 27.12.2007; Оpubл. 25.11.2009, Бюл. № 22 – 6 с.
110. Miller, Principles of Infrared Technology (Van Nostrand Reinhold, 1992), and Miller and Friedman, Photonic Rules of Thumb, 2004. – ISBN 978-0-442-01210-6

111. Современные датчики. Справочник. Дж. Фрайден / Пер. с англ. Ю. А. Заболотной под ред. Е. Л. Свинцова. М. : Техносфера. – 2005.
112. Хрусталеv Д. Детекторы перемещения и их практическое применение / Д. Хрусталеv // Схемотехника. – 2001. – № 3. – С. 2–4.
113. Котюк А. Ф. Датчики в современных измерениях / А. Ф. Котюк // М. : Радио и связь, – 2006.
114. Grimes C. A. Encyclopedia of Sensors (10-Volume Set) / C. A. Grimes, E. C. Dickey, M. V. Pishko // American Scientific Publishers. – 2006. – ISBN 1-58883-056-5.
115. Методы обнаружения и исследования пирозффекта / [Новик В. К., Гаврилова Н. Д., Ройтберг М. Б., Рабинович А. З.] // – «Электронная техника. Серия 14. Материалы», 1969, выпуск 1. – С. 167–173.
116. Анализ измерительных информационных систем / [Маликов В. Т., Дубовой В. М., Кветный Р. М., Исматуллаев П. Р.] – Ташкент : Фан, 1984. –176 с.
117. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом: моногр. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук / Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. –163 с. – ISBN 978-966-641-214-3.
118. Кузнецов Ю. В. Основы анализа линейных радиоэлектронных цепей (Временной анализ) : учеб. пособ. / Ю. В. Кузнецов, Ю. В. Тронин // – М. : Изд-во МАИ, 1992. – 60 с.: ил.
119. Курганов С. А. Анализ установившихся режимов линейных электрических цепей методом схемных определителей: учебное пособие / С. А. Курганов, В. В. Филаретов // – Ульяновск : УлГТУ, 2002. – 148 с.
120. Курганов С. А. Схемно-алгебраическое моделирование и расчет линейных электрических цепей: учебное пособие / С. А. Курганов, В. В. Филаретов // – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 319 с.
121. Zhang X. Application of Chalcogenide Glass Bulks and Fibers / X. Zhang, H. Ma, J. Lucas // J. Optoelectron. Adv. Mater. – 2003. – Vol. 5, № 5. – 1327 p.
122. Осадчук О. В. Метод вхідного контролю структурно-чутливих параметрів некристалічних напівпровідників /

О. В. Осадчук, С. В. Барабан, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 3. – С. 90–93.

123. Федотов Яков Андреевич. Кремниевые планарные транзисторы / Я. А. Федотов. – М. : Советское радио, 1973. – 336 с.

124. Тугов Н. М. Полупроводниковые приборы / Н. М. Тугов, Б. А. Глебов, Н. А. Чарыков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

125. Маллер Ричард. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М. : Мир, 1989. – 630 с.

126. PSPICE User's guide. MicroSim Corporation. – La Cadena Drive, Laguna Hills, 1989. – 450 p.

127. Кузнецов Юрий Васильевич. Основы анализа линейных радиоэлектронных цепей (Временной анализ) : учеб. пособ. / Ю. В. Кузнецов, Ю. В. Тронин. – М. : Изд-во МАИ, 1992. – 60 с.

128. Разевиг Всеволод Данилович. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 72 с.

129. Разевиг Всеволод Данилович. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 3. Моделирование аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 120 с.

130. ГОСТ Р 53293-2009. Национальный стандарт Российской Федерации / Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа / Разработан ФГУ ВНИИПО МЧС России. – М. : Стандартинформ, 2009. – 18 с.

131. Енциклопедія термометрії / [Я. Т. Луцик, Л. К. Буняк, Ю. К. Рудавський, Б. І. Стадник] // – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка». – 2003. – 428 с.

132. Лукінюк Михайло Васильович. Технологічні вимірювання та прилади: Навчальний Посібник / М. В. Лукінюк. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с. – ISBN 966-622-148-9.

133. Вимірювання температури: теорія та практика / [Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник] // – Львів : Бескід-Біт. – 2006. – 580 с.

134. ДСТУ 2681-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення. Державний стандарт

України / П. П. Орнатський, Н. А. Яремчук, Б. Ф. Марков, О. М. Вінниченко та ін. – К. – Чинний від 01.01.1995 р. – 68 с.

135. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навч. посіб. / [Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк] – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.

136. Стабилизатор напряжения LM7805 [Электронный ресурс]: Техническая документация на стабилизатор напряжения. – Режим доступа: <http://www.avrlab.com/node/29>

137. Поджаренко Володимир Олександрович. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук. – К. : УМК ВО, 1991. – 240 с.

138. Осадчук Володимир Степанович. Сенсори вологості : моногр. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2003. – 210 с. – ISBN 966-641-055-9.

139. Электрические измерения: учебник для вузов / [Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин и др.]; под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – Л. : Энергия, 1980. – 392 с.

140. Райс В. Как работают аналогово-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП? [Электронный ресурс] / В. Райс // Компоненты и технологии. – 2005. – № 3. – Режим доступа: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/05_03/stat_adc.htm

141. Особенности построения корпоративных сетей интеллектуальных датчиков параметров технологических процессов / [В. Л. Костенко, Е. Я. Швец, А. В. Максименюк, Е. Н. Киселев] // Металлургия: сборник научных трудов. Выпуск 8. – Запорожье : ЗГИА, 2003. – С. 146–148.

142. Пономарев Сергей Васильевич. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: Монография. Книга 1 / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2006. – 204 с. – ISBN 5-8265-0439-0.

143. Пономарев Сергей Васильевич. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: Монография. Книга 2 / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2006. – 216 с. – ISBN 5-8265-0451-X.

144. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. / С. Зи // – М. : Мир, 1984. – 456 с.

145. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2. / С. Зи // – М. : Мир, 1984. – 456 с.
146. Мулярчик С. Г. Численное моделирование микроэлектронных структур / С. Г. Мулярчик // – Минск : Университетское, 1989. – 368 с.
147. Бубенников А. И. Моделирование интегральных микротехнологий приборов и схем / А. И. Бубенников // М. : Высшая школа, 1989. – 320 с.
148. Кремлев В. Я. Автоматизация проектирования БИС. В 6 кн.: Практ. Пособие. Кн. 5 / В. Я. Кремлев // Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС / Под ред. Г. Г. Казеннова. – М. : Высшая школа, 1990. – 144 с.
149. Анализ и расчет интегральных схем. В 2 кн. Кн. 1. Основы расчета интегральных схем и линейные схемы / Под ред. Д. Линна и др. Пер. с англ. – М. : Мир, 1969. – 367 с.
150. Бриндли К. Измерительные преобразователи : справочное пособие: Пер. с англ. / К. Бриндли // – М. : Энергоатомиздат, 1991. – С. 55–57.
151. USB-частотомір / [Осадчук О. В., Барабан С. В., Звягін О. С., Криночкін Р. В.] / Матеріали 6-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Дни науки – 2010» / Номер 25 / Технические науки / Электротехника и радиоэлектроника / Praha. Publishing House «Education and Science» s. r. o. – С. 32–34.
152. Бутырин П. А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 – М. : ДМК Пресс, 2005.
153. Дорожовець Михайло Миронович. Опрацювання результатів вимірювання : навч. посіб. / М. М. Дорожовець. – Львів : Вид-во нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2007. – 624 с. – ISBN 978-966-553-640-6.

Наукове видання

**Осадчук Володимир Олександрович
Осадчук Олександр Володимирович
Барабан Сергій Володимирович**

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР
З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ
ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено С. Барабаном

Підписано до друку 30.01.2015 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 12,24
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2015-01

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.