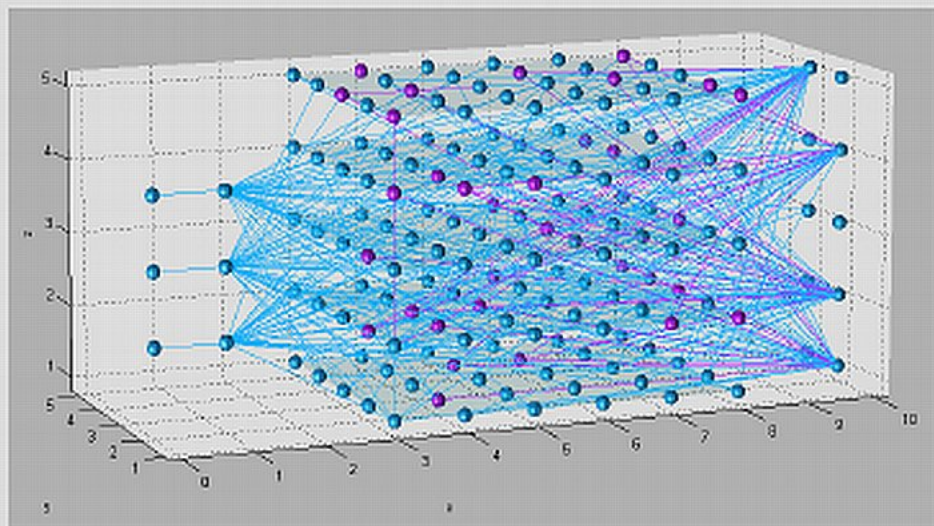


О. К. Колесницький

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ РОЗПІЗНАВАННЯ
СИГНАЛІВ МУЛЬТИСЕНСОРІВ
ГАЗІВ НА ОСНОВІ ІМПУЛЬСНИХ
НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

О. К. Колесницький

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ РОЗПІЗНАВАННЯ
СИГНАЛІВ МУЛЬТИСЕНСОРІВ ГАЗІВ
НА ОСНОВІ ІМПУЛЬСНИХ
НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

Монографія

**Вінниця
ВНТУ
2011**

УДК 004.032.26

ББК 32.973-04

К24

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 23.12.2010 р.)

Рецензенти:

Ю. М. Романишин, доктор технічних наук, професор

А. М. Пстух, доктор технічних наук, професор

Колесницький, О. К.

К24 Методи і засоби розпізнавання сигналів мультисенсорів газів на основі імпульсних нейронних мереж: монографія / О. К. Колесницький. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 120 с.

ISBN 978-966-641-407-9

В монографії розглянуто метод розпізнавання сигналів мультисенсорів газів на основі імпульсної нейронної мережі, метод навчання цієї мережі, а також принципи побудови архітектури мережі. Описано технічну реалізацію та математичні моделі імпульсних нейронних елементів на біспін-приладі, варіант технічної реалізації всієї мережі на оптоелектронній елементній базі. Наведено результати експериментальних досліджень нейронних елементів та комп'ютерного моделювання процесу розпізнавання. Розглянуті методи та засоби відрізняються від відомих підвищеною швидкістю (можливе навіть розпізнавання з передбаченням).

УДК 004.032.26

ББК 32.973-04

ISBN 978-966-641-407-9

© О. Колесницький, 2011

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ МУЛЬТИСЕНСОРІВ ГАЗІВ	10
1.1 Завдання медичної діагностики і екологічного моніторингу, вирішувані системами розпізнавання сигналів мультисенсорів газів	11
1.2 Мультисенсори, що використовуються для систем розпізнавання газів	12
1.3 Методи розпізнавання сигналів мультисенсорів газів	20
1.4 Засоби реалізації нейромережових методів розпізнавання сигналів мультисенсорів газів.....	29
1.5 Шляхи вдосконалення методів і засобів розпізнавання сигналів мультисенсорів газів	29
ВИСНОВКИ.....	35
2. РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ І НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МЕТОДУ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ МУЛЬТИСЕНСОРІВ ГАЗІВ.....	36
2.1. Вибір принципів формування вихідних сигналів мультисенсорів газів	36
2.2. Розробка і дослідження моделей імпульсних нейронних елементів	39
2.2.1 Формальні моделі імпульсних нейронних елементів	42
2.2.2 Розробка моделі імпульсного нейронного елемента з роздільними входами	46
2.3. Розробка елементів архітектури імпульсної нейронної мережі для розпізнавання сигналів мультисенсорів газів.....	51
2.3.1 Аналіз моделі і структури імпульсної нейронної мережі....	53
2.3.2 Вдосконалення структури імпульсної нейронної мережі для розпізнавання сигналів мультисенсорів газів.....	57
2.4. Розробка методу навчання для оптоелектронних імпульсних нейронних мереж.....	60
2.5. Метод розпізнавання сигналів мультисенсорів з використанням імпульсної нейронної мережі.....	67
ВИСНОВКИ.....	70

3. РОЗРОБКА КОМПОНЕНТІВ І СИНТЕЗ НА ЇХ ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ МУЛЬТИСЕНСОРІВ ГАЗІВ	71
3.1 Реалізація імпульсних нейронних елементів на біспін-приладах.....	72
3.1.1 Реалізація інтернейрона на біспін-приладі.....	72
3.1.2 Реалізація вхідного імпульсного нейрона на біспін-приладі	77
3.1.3 Реалізація вихідного імпульсного нейрону на біспін-приладі	78
3.2 Розробка апаратної реалізації імпульсної нейромережевої системи для розпізнавання сигналів мультисенсорів газів на оптоелектронній елементній базі.....	79
3.2.1 Обґрунтування вибору виду оптоелектронної елементної бази.....	79
3.2.2 Синтез оптоелектронної імпульсної нейромережевої системи для розпізнавання сигналів мультисенсорів газів.....	83
3.2.3 Розробка режимів роботи оптоелектронної імпульсної нейромережевої системи для розпізнавання сигналів мультисенсорів газів	88
3.3 Оцінка основних параметрів ІНМ на оптоелектронній елементній базі	90
ВИСНОВКИ	91
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНЕНТІВ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІМПУЛЬСНОЇ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ МУЛЬТИСЕНСОРІВ.....	92
4.1 Експериментальні дослідження параметрів інтернейронів на основі біспін-приладів	92
4.2 Оцінка адекватності інтернейронів на біспін-приладі формальній LIF-моделі нейрона	98
4.3 Розробка методики і аналіз результатів комп'ютерного моделювання методу розпізнавання сигналів мультисенсорів газів на основі імпульсної нейронної мережі.....	100
4.4 Рекомендації щодо використання методу розпізнавання сигналів мультисенсорів газів на основі імпульсних нейронних мереж.	107
ВИСНОВКИ	108
ПІСЛЯМОВА.....	109
ЛІТЕРАТУРА	111

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- LIF – leaky integrate-and-fire
- ppm – parts per million (часток на мільйон)
- SVM – support vector machine
- VLSI – very large scale integration (circuits)
- АРС – автомат з «рідкими станами»
- ЕКТ – електрично керований транспарант
- ЕНГ – елементи на надгратках
- ЗЗ – зворотний зв'язок
- ІНМ – імпульсні нейронні мережі
- ІФП – інтерферометр Фабрі-Перо
- ІЧ – інфрачервоний
- к-МОН – комплементарний метал-оксид-напівпровідник (транзистор)
- МКІ – монокристалічні інтерферометри
- НВІС – надвеликі інтегральні схеми
- ОБЕ – оптично бістабільні елементи
- ОКТ – оптично керований транспарант
- ОПЗ – область просторового заряду
- ПАХ – поверхнево активні хвилі
- ПДОЕС – просторово-дискретні оптоелектронні структури
- ПНОЕС – просторово-неперервні оптоелектронні структури
- ПЧМС – просторово-часові модулятори світла
- ТПІ – тонкоплівкові інтерферометри
- ФП-ЕОК – фотоприймач – електрооптичний кристал
- ФП-РК – фотоприймач – рідкий кристал
- ЦЛ – циліндрична лінза
- ЦНС – центральна нервова система

ВСТУП

Нейромеревеві методи і засоби є незамінними при розв'язанні завдань розпізнавання образів різної природи (зображення, звуки, запахи і т. ін.), ухвалення рішень і тому подібне. Людина сприймає образи за допомогою органів чуття (очі, вуха, ніс та ін.), які є багатоконпонентними сенсорами (рецепторами), іншими словами – мультисенсорами. Ці мультисенсори видають багатоканальну інформацію у вигляді сукупності сигналів (аналогових або імпульсних). Центральна нервова система (ЦНС) людини має справу не з самим образом, а з результатом дії цього образу на рецептори, тобто з сукупністю сигналів. Для ЦНС об'єктом є сукупність сигналів, що генеруються рецепторами, які проходять потім складну обробку. Тому при побудові нейроморфних інтелектуальних систем нових поколінь (систем штучного інтелекту) велике значення має розв'язання проблеми розпізнавання сигналів мультисенсорів.

Все частіше нейромеревеві підходи застосовуються для розв'язання завдання розпізнавання запахів (газів), а розв'язання цієї задачі вельми необхідне в таких сферах, як визначення діагнозу в медицині, визначення якості продуктів харчування, аналіз концентрації шкідливих речовин в екології, пошук вибухових і наркотичних речовин при організації безпеки.

В даний час вельми актуальним є завдання розпізнавання образів різної природи (візуальних образів – зображень, звукових образів – мови, складу і концентрації газів і рідин – запахів і смаків). Проте не завжди вдається успішно проводити розпізнавання образів за допомогою обчислювальних засобів, заснованих на функціонуванні за будь-яким алгоритмом. Тут на допомогу традиційним методам і засобам приходять нейромеревеві методи і засоби, основна відмінність яких полягає в тому, що з їх допомогою можна вирішувати неформалізовані завдання, для яких через ті або інші причини не існує детермінованих алгоритмів розв'язання.

У більшості практичних завдань нейромеревеві методи і засоби використовують для обробки багатоканальної інформації (сигналів мультисенсорів). Це відбувається при обробці зображень, сигналів ра-

дарів, антенних ґраток, сигналів від давачів параметрів технологічних процесів і так далі. Тому ефективне розв'язання задачі розпізнавання сигналів мультисенсорів в загальній постановці дозволить знайти ключ до підвищення ефективності розв'язання багатьох практичних завдань.

Прикладом практичного застосування нейромережевих методів і засобів розпізнавання сигналів мультисенсорів є прилади для аналізу і розпізнавання газів, які останнім часом прийнято називати «електронний ніс». Вони складаються з недорогих багатокомпонентних давачів (мультисенсорів) і інтелектуальної системи для обробки сигналів цих давачів. Крім того, можна навести багато інших прикладів використання нейромережевих методів і засобів розпізнавання сигналів мультисенсорів – «електронний язик», штучну ретину (сітківка ока) та ін.

Але прилади типу «електронний ніс», що є на сьогоднішній день, ще далекі від досконалості. Частенько в них використовуються нейронні мережі на формальних нейронах, які пристосовані для розпізнавання не динамічних сигналів, а статичних векторних даних. Тому для їх використання доводиться перетворювати динамічні сигнали з виходів мультисенсорів газів у вектори чисел (застосовуючи виділення ознак з сигналів або їх розкладання в будь-який функціональний ряд), а ці вектори потім розпізнавати за допомогою нейронних мереж на формальних нейронах. Тому такі нейромережеві методи і засоби характеризуються низькою швидкістю і втратою корисної інформації через її перетворення в іншу форму. Крім того, вони часто реалізуються програмно або програмно-апаратно, що, як відомо, не дозволяє мати мережі з великою кількістю нейронів і проводити їх швидке навчання, а це значно знижує такі їх експлуатаційні характеристики, як кількість розпізнаваних еталонів, достовірність розпізнавання, швидкість навчання, здатність до адаптації і донавчання і т. ін.

Найбільшого ефекту можна досягти в разі використання таких нейронних мереж, які дозволяли б обробляти динамічні сигнали мультисенсорів газів без їх попереднього перетворення, а окрім цього застосовувати їх апаратну реалізацію, причому на оптоелектронній елементній базі, де легко організуються численні зв'язки нейронів. Теоретичні і практичні засади використання нетрадиційних нейронних

мереж для розпізнавання газів і їх апаратної реалізації на оптоелектронній елементній базі досліджені недостатньо, тому це завдання є вельми актуальним.

Ці наукові дослідження виконувалися відповідно до плану наукових досліджень Вінницького національного технічного університету і Міністерства освіти і науки України за держбюджетними темами:

- 57-Д-248 «Лазерні і оптико-електронні технології в діагностиці, терапії і прогнозуванні стану серцево-судинної системи» (№ держ. реєстрації 0102U002272).

- 57-Д-249 «Образний відеокомп'ютер» (№ держ. реєстрації 0102U002261).

Мета і завдання дослідження – створення методів і високоефективних засобів розпізнавання сигналів мультисенсорів газів на основі імпульсних нейронних мереж при їх реалізації на оптоелектронній елементній базі, які характеризуються поліпшенням основних експлуатаційних характеристик (підвищення швидкодії, спрощення апаратної реалізації, спрощення процесу навчання).

В результаті досліджень, висвітлених в монографії, досягнуто таких результатів:

1. Проведено аналітичний огляд відомих методів і засобів розпізнавання сигналів мультисенсорів газів, виявлено їх можливості, переваги і недоліки, обгрунтовано напрями їх вдосконалення.

2. Розроблено метод розпізнавання сигналів мультисенсорів газів із застосуванням імпульсної нейронної мережі оптоелектронного типу, вдосконалено структуру імпульсної нейронної мережі, запропоновано варіанти реалізації нейронів імпульсної нейронної мережі на основі фоточутливих біспін-приладів.

3. Розроблено метод навчання імпульсної нейронної мережі оптоелектронного типу зі спрощеною процедурою апаратного навчання при реалізації синапсів імпульсної нейронної мережі на основі просторово-часових модуляторів світла.

4. Розроблено уточнену математичну модель імпульсного нейрона на основі біспін-приладу з метою визначення її адекватності математичній моделі формального імпульсного нейрона.

5. Розроблено схеми апаратної реалізації імпульсних нейронів на біспін-приладах, а імпульсної нейронної мережі в цілому – на оптоелектронній елементній базі зі здійсненням всіх міжз'єднань між нейронами у вигляді оптичних сигналів.

6. Проведено експериментальні дослідження імпульсних нейронів на біспін-приладах, в результаті яких отримано числові значення їх параметрів.

7. Розроблено методику і проведено комп'ютерне моделювання імпульсної нейронної мережі для розпізнавання сигналів мультисенсорів газів. Наведено результати моделювання, які свідчать про ефективність розроблених методів і засобів.

Основні результати монографії опубліковано в роботах [1–11].

Об'єкт дослідження – процеси розпізнавання сигналів мультисенсорів газів в штучних імпульсних нейронних мережах оптоелектронного типу.

Предмет дослідження – основні характеристики методів і засобів розпізнавання сигналів мультисенсорів газів, побудованих на основі імпульсних нейронних мереж при їх реалізації на оптоелектронній елементній базі (швидкодія, конструктивна складність, складність процесу навчання).

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ МУЛЬТИСЕНСОРІВ ГАЗІВ

В наш час вельми важливим і економічно обгрунтованим є завдання побудови ефективних нейромережових методів і засобів для розпізнавання образів різної природи – візуальних образів (зображень), звукових образів (наприклад, мови), хімічного складу газових сумішей (запахи), хімічного складу рідких середовищ (смак), розпізнавання різних станів технологічних процесів за сигналами від давачів технологічних параметрів і так далі. Для розв'язання цього завдання розробляються різні інтелектуальні системи: системи технічного зору, системи розпізнавання мови, системи типу «електронний ніс» і «електронний язик», інтелектуальні системи управління технологічними процесами і ін.

За допомогою портативних приладів для аналізу і розпізнавання газів, які останнім часом прийнято називати «електронний ніс» [12–23], можна ефективно вирішувати, в першу чергу, проблеми охорони здоров'я і захисту довкілля. Це, перш за все, рання і всебічна діагностика стану здоров'я людини і контроль концентрації шкідливих речовин в повітрі, що оточує нас, здатних викликати патологічні зміни. Також важлива пов'язана із здоров'ям людини проблема контролю якості продуктів харчування.

Компактні комп'ютерні системи для аналізу і розпізнавання газів, які останнім часом прийнято називати «електронний ніс», на відміну від відомих газових і рідинних хроматографів, спектрофотометрів і мас-спектрометрів, є дешевшими, не вимагають великих витрат часу на аналіз, і, найголовніше, можуть застосовуватись для досліджень у позалабораторних («польових») умовах, що є важливим для широкого застосування в медицині, особливо в телемедицині, в криміналістиці, в забезпеченні безпеки (пошук вибухових, отруйливих і наркотичних речовин) і спеціальній військовій техніці.

Саме з цієї причини стають пріоритетними розробки простих, і, найголовніше, швидкодіючих приладів для розпізнавання газів в

практичних умовах, які володіють широкими функціональними можливостями.

1.1 Завдання медичної діагностики і екологічного моніторингу, вирішувані системами розпізнавання сигналів мультисенсорів газів

Прилади типу «електронний ніс» вже сьогодні з успіхом використовуються для розв'язання багатьох актуальних завдань в різних сферах діяльності людини. Далеко не повний перелік їх наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Завдання, що вирішуються за допомогою приладів для розпізнавання газів

Галузь	Завдання
Екологія	<ul style="list-style-type: none"> • Визначення наявності і концентрації метану в шахтах • Контроль повітря на забрудненість нафтопродуктами, шкідливими промисловими викидами і іншими шкідливими речовинами • Контроль ґрунту на забрудненість • Гігієнічна оцінка повітря в приміщенні (процентний склад компонентів повітря, оскільки велика концентрація CO₂ викликає швидку стомлюваність, CO шкідливе для здоров'я) • Визначення виду і концентрації летких з'єднань токсинів і канцерогенів (фарби, розчинники, клеї, косметика, газети, ДСП і так далі)
Медицина	<ul style="list-style-type: none"> • Діагностика за повітрям, що видихається пацієнтом, таких захворювань: тонзиліт, дифтеріт, діабет, респіраторні інфекції, дитячі хвороби, пневмонія, синусит, рак легенів, хвороби печінки (наприклад, цироз) і нирок, SARS, туберкульоз, ацетон • Діагностика за аналізом випарів проби крові інфекційних захворювань (різні види бактерій виділяють в процесі метаболізму різні речовини, визначаючи які можна судити про вид бактерій) • Профілактика отруєнь і кишкових інфекцій шляхом визначення зіпсованих і таких, що містять хвороботворні бактерії, продуктів
Охорона правопорядку	<ul style="list-style-type: none"> • Виявлення наркотиків, вибухових речовин, використання в судово-хімічній експертизі, розпізнавання людей за запахом (бази даних), протипожежні системи раннього сповіщення

Таблиця 1.1 (Продовження)

Галузь	Завдання
Харчова і парфюмерна промисловість	<ul style="list-style-type: none"> • Контроль технологічного процесу виготовлення пива, обсмаження зерен кави і ін. • Контроль якості м'яса і інших продуктів харчування, що швидко псуються • Визначення якості кави, какао, спиртних напоїв, ароматичних речовин, молока • Визначення фальсифікованих харчових продуктів в торгівлі (кава, коньяк і ін.) • Визначення складу і якості парфюмерії (парфуми, мило, шампунь і ін.)

Проте, через дорожнечу таких приладів вони поки що недостатньо широко застосовуються, як того хотілося б. Крім того, вони поки що далекі від досконалості через недостатню достовірність визначення складу газів у багатьох випадках (особливо при аналізі багатокомпонентних за складом газових сумішей), кількість розпізнаваних газів невелика через апаратні обмеження. Тому вельми актуальним є завдання вдосконалення, спрощення і підвищення технологічності як давачів, так і методів і апаратури розпізнавання сигналів первинних перетворювачів. Менш пропрацьованим є питання розробки методів і засобів ефективного розпізнавання сигналів мультисенсорів газів на основі нейронних мереж при їх апаратній реалізації на оптоелектронній елементній базі.

1.2 Мультисенсори, що використовуються для систем розпізнавання газів

У найзагальнішому вигляді систему для розпізнавання сигналів мультисенсорів газів можна представити структурною схемою згідно з рис. 1.1.

Мультисенсор газів в більшості реалізацій є системою, що містить чутливі до різних газів елементи, і мікрокомпресор для прокачування досліджуваного газу через об'єм з чутливими елементами. Чутливі елементи видають електричні сигнали (напруга, струм або частота),

які підсилюються і попередньо обробляються у формувачі інформативних сигналів (інколи ці сигнали можна назвати ознаками). Далі ці сигнали подаються на вхід інтелектуальної системи розпізнавання, яка може бути реалізована, принаймні, в одному з нижче перерахованих видів:

- кореляційна система розпізнавання;
- експертна система;
- нейроподібна система.

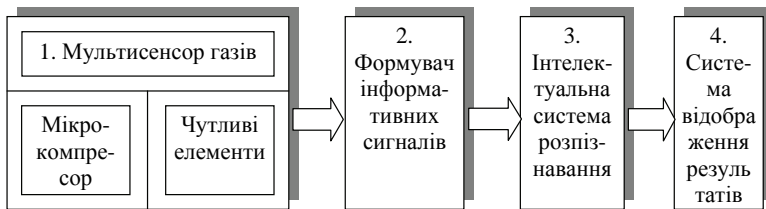


Рис. 1.1. Структурна схема системи розпізнавання сигналів мультисенсорів газів

Результати роботи системи розпізнавання відображаються в зручному для сприйняття людиною вигляді за допомогою системи відображення.

Відомі на сьогоднішній день види мультисенсорів газів зведені в табл. 1.2 [13].

Металоксидні сенсори застосовуються значно частіше для розв'язання різних практичних завдань і внаслідок цього є значно доступнішими. Принцип дії таких сенсорів заснований на зміні провідності низки широкозонних напівпровідників на основі оксидів олова, цинку, титану, вольфраму, індію та іридію, легованих металами з каталітичними властивостями (паладій, платина) при підвищеній температурі у присутності аналізованих газів.

У складі сенсора напівпровідниковий матеріал, що взаємодіє з молекулами газів, розташовується між двома металевими контактами поверх резистивного нагрівального елемента, що забезпечує робочу температуру сенсора в діапазоні 20...400 °С. З метою зниження енергоспоживання приладу і надмірних втрат на тепловиділення, викорис-

товуються сенсори мінімальних габаритів із застосуванням мікроелектронних технологій.

Таблиця 1.2

Порівняння різних типів мультисенсорів для систем розпізнавання газів

Тип сенсора	Принцип вимірювання	Спосіб виготовлення	Межа виявлення	Комерційна доступність	Фірма-виробник
Метал-оксидний	Провідність	Мікроелектронні технології	5...500 ppm	доступні багато типів	Lennartz Electronics GMBH, Alpha MOS-Multy Organoleptic Systems, Nordic Sensor Technologies
Провідні полімери	Провідність	Технологія мікродрук	0,1...100 ppm	За спец замовленням	Alpha MOS-Multy Organoleptic Systems, Aroma scan PLC, Cyrano Science Inc
П'єзо-кристал. мікроваги	Приріст маси	Технології нанесення мікроплівок	у діапазоні 1,0 нг	доступні декілька типів	HKR Sensorsystems GMBH, Alpha MOS-Multy Organoleptic Systems
Поверхневі акустичні хвилі	Приріст маси	Технології нанесення мікроплівок	у діапазоні 1,0 пг	доступні декілька типів	Savtec Inc, Electronic Sensor Technology IEEV Ltd Chemical Sensor Systems
Каталітичні транзистори	Вимірювання ємнісних зарядів	Мікроелектронні технології	у діапазоні 1 ppm	лише за спец замовленням	Nordic Sensor Technologies
Оптоелектронні сенсори	Флуоресценція, ІЧ-спектр, аналіз мікроплівок	Точні технології, нанесення барвників	нижче 1 ppb	у розробці, за спецзамовленням	Nordic Sensor Technologies

На одній стороні підкладки з сапфіра розташований тонкоплівковий платиновий нагрівач, а на іншій – чутливі напівпровідникові елементи і електроди. Незначний температурний градієнт між нагрівачем і чутливими шарами дозволяє з високою точністю підтримувати постійну робочу температуру шляхом стабілізації опору нагрівача. Основним завданням, що вирішується шляхом легування оксидних матеріалів, є здобуття максимально досяжної специфічності по відношенню до цільових компонентів газових сумішей. Додаткові можливості підвищення селективності надає правильний вибір операційної температури.

Як правило [13], межа визначення сенсорів на основі оксидних матеріалів знаходиться в межах 5...500 ppm (часток на мільйон). Наголошується досить висока (завадова) чутливість сенсорів цього типу до водяної пари і схильність до дрейфу базової лінії. Компенсація такого дрейфу, який визначається багатьма причинами, забезпечується алгоритмами, що закладаються в процесорний пристрій обробки даних. Металоксидні сенсори проявляють також схильність до отруєння (безповоротного інгібування) за рахунок летких з'єднань сірки і деяких інших органічних сполук. Та все ж, не дивлячись на відмічені недоліки, низька вартість і комерційна доступність саме цього типу сенсорів визначили в даний час його найбільш широке поширення.

Полімерні провідні сенсори [13]. Як активні матеріали сенсорів провідності також досить широко використовуються провідні органічні полімери з класу поліпіролів, тіофенолів, індолів, анілінів або фурану. При експонуванні таких полімерів в газах можуть утворюватися різні типи зв'язків (іонні асоціати, комплекси з перенесенням заряду і ін.), що змінюють природу електронних рівнів. Це відбивається на ефективності перенесення електрона по полімерному ланцюгу, тобто, інакше кажучи, відбувається зміна його провідності. Вплив тих або інших газів на полімерну провідність в значній мірі визначається вибраним для вимірювання протиіоном, а також функціональними групами, за допомогою яких модифіковано матеріал полімеру-основи. Використання полімерних сенсорів в пристроях «електронний ніс» так само, як і для металоксидних сенсорів, засновано на широкому вживанні мікроелектронних технологій (виготовлення електродних підк-

ладок із зазорами між окремими електродами 10...20 мкм і ін.). Мікронні шари поліпірола можуть бути сформовані з рідких мономірних компонентів методом електрополяризації при циклуванні напруги від мінус 0,7 В до 1,4 В. Необхідна різноманітність активних матеріалів для створення лінійки сенсорів досягається як варіюванням параметрів циклування, так і використанням різних (із задалегідь підібраними властивостями) попередників полімерів. Відповідно до дифузійного характеру поширення молекул ПВ в чутливому шарі час відгуку полімерного сенсора пропорційний товщині активної зони полімеру. Для його зниження йдуть шляхом зменшення розміру зони до мікронного рівня. Полімерні сенсори працездатні при кімнатних температурах. Тому вони простіші в налагодці і експлуатації у складі портативних приладів. Межа виявлення газів може досягати 0,1 ppm, але зазвичай знаходиться в діапазоні 10...100 ppm.

Основні недоліки існуючих технологій створення полімерних сенсорів пов'язані із складністю методик формування чутливих шарів, що вимагають витрат часу і що не забезпечують високої відтворюваності властивостей матеріалу в серії. Проте, враховуючи швидкий розвиток фізикохімії полімерів у напрямі цільового «конструювання», цей тип сенсорів є, без сумніву, виключно перспективним. Саме на цій основі найближчим часом можуть бути запропоновані принципово нові технічні модифікації «електронного носа» для первинного виявлення і ідентифікації практично важливих речовин і їх сумішей (отруйні, сильнодіючі, наркотичні речовини і ін.) у позалабораторних умовах.

Сенсори на основі вимірювань приросту маси [13]. Сімейство п'єзоелектричних сенсорів для вимірювання приросту маси, як і сімейство сенсорів, заснованих на вимірюваннях провідності, розділяється на два підвиди: кварцеві кристалічні мікроваги (ККМ) і сенсори на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). ККМ-сенсор є кварцевим диском резонатора діаметром декілька міліметрів з металевими електродами з обох боків. При збудженні змінним струмом кристал характеризується власною резонансною частотою (наприклад, 10 МГц або 30 МГц), що визначається, у тому числі, його масою. Відповідно до встановленої залежності зміна резонансної частоти від приросту маси при цьому складає

$$\lambda F = -2,3 \cdot 10^6 \cdot F^2 \cdot \lambda m / A$$

де λF – зсув частоти (Гц); F – резонансна частота п'єзокристала (МГц); λm – приріст маси кристала (г) за рахунок адсорбції газу і A – площа активної зони кристала (см²).

При експозиції сенсорів досліджуваними газами останні адсорбуються на поверхні полімерного покриття. Подальша експозиція кристала в очищуючому газі повертає резонансну частоту до первинного рівня.

Адаптація ККМ до спеціальних технічних застосувань досягається, як правило, застосуванням спеціального полімерного покриття. Значне полегшення цього завдання дає використання відомих селективних фаз, вживаних в газовій хроматографії. Розглядаються окремі пропозиції з використання в якості фази, що сорбує, наприклад, для виявлення пари вибухових речовин, специфічних антитіл. Відомі позитивні результати досліджень військових фахівців із створення пристроїв виявлення кількостей слідів токсичних і отруйних газів з межею виявлення на рівні 1 пг (пікограм). Наголошується характерна особливість ККМ, пов'язана з лінійністю калібрувальної кривої в широкому динамічному діапазоні. Час відгуку і час відновлення селективних резонансних структур мінімізується шляхом зменшення як розмірів і маси кристала кварцу, так і товщини сорбційного шару. Слід зазначити досить загальну властивість всіх приладів, в яких розробники активно застосовують мікроелектронні технології при виготовленні давачів. Дійсно, при переході до субмікронного рівня виготовлення елементів вимірювальних пристроїв відношення поверхня/об'єм збільшується, при цьому до пристроїв вносяться визначені нестабільності, які погіршують співвідношення сигнал/шум і, врешті-решт, знижують точність вимірювань. Ця закономірність справедлива практично для всіх типів пристроїв, що виготовляються з високою мірою мікромініатюризації.

Сенсори на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). ПАХ-сенсори є найближчими «родичами» сенсорів, виготовлених за ККМ-технологією. Поверхневими акустичними хвилями, як впливає з визначення, називаються хвилі, що поширюються по поверхні при-

строю, не проникаючи в об'єм. ПАХ оперують при значно вищих, ніж ККМ, частотах (типові ПАХ працюють при частоті в сотні МГц). При цьому ПАХ можуть генерувати значно більші зміни частоти реєстрованого сигналу [13].

Будучи планарними за своєю природою, ПАХ реалізуються із застосуванням сучасних технологій фотолітографії, розвинених в мікроелектроніці. Це визначає технологічні і вартісні переваги ПАХ по відношенню до інших типів сенсорів, особливо в тих випадках, коли лінійка сенсорів у складі «електронного носа» має бути за умовами вирішуваного практичного завдання досить показною.

Селективність сенсорам, що виготовляються за ПАХ-технологіями, надається (так само, як і сенсорам в технології ККМ) за допомогою спеціальних полімерних покриттів. Диференціальний спосіб вимірів дозволяє позбутися систематичних похибок, що вносяться змінами вологості, температури і ін. Наприклад, два близько розташованих ПАХ-сенсори, один з яких має спеціальне полімерне покриття, однаково реагують на зміну температури, що дозволяє в різнищевому сигналі автоматично врахувати її вплив.

Певним недоліком модифікацій сенсорів, побудованих на вимірюванні приросту маси (ККМ і ПАХ), є складніша схемотехнічна реалізація порівняно із сенсорами провідності, проте часто цей недолік компенсується нижчою межею виявлення цільових компонент запахів. «Старіння» чутливих мембран (активних зон сенсорів) також є певною технічною проблемою, вирішення якої досягається програмними методами, що забезпечують своєчасне підстроювання приладу.

Сенсори на основі каталітичних польових транзисторів (МОКПТ) [13]. У основу роботи чутливих до запахів метал-оксид-кремнієвих польових транзисторів (МОКПТ) покладені хімічні реакції летких органічних сполук в активній зоні сенсора, прискорювані каталітично активними металами. Рухливі продукти реакції, які дифундують через затвор МОКПТ, змінюють електричні параметри транзистора, що і призводить до виникнення посиленого аналітичного сигналу. Типова МОКПТ-структура включає напівпровідникову структуру *p*-типу з двома *n*-легованими областями і металевими контактами. Чутливість і селективність приладу забезпечується варіюванням товщини активної

зони і типу каталізаторів, а також підбором операційних температур, при яких функціонують елементи системи. Один з недоліків МОКПТ-сенсоров безпосередньо пов'язаний з принципом їх функціонування, у відповідності до яких продукт каталітичної реакції (наприклад, водень) повинен продифундувати через каталітично активний шар, щоб вплинути на зарядочутливу структуру. Для цього в конструюванні сенсора передбачається наявність своєрідного «вікна» проникності між каталітично активним шаром і затвором транзистора. Технологічно ці вимоги задовольнити досить складно, у зв'язку з чим використання МОКПТ-сенсорних пристроїв на даний час обмежується, в основному, лабораторними дослідженнями.

Оптичні волоконні сенсори. Оптичні волоконні сенсори (ОВС) – ще один сучасний тип сенсорів, що використовуються в пристроях типу «електронний ніс». Вони використовують як чутливі елементи, скляні мікроволоконна, покриті хімічно активним матеріалом по торцю або бічній поверхні. Хімічно активний матеріал створюється на основі спеціально підібраних або синтезованих флюоресцентних барвників, іммобілізованих в полімерній матриці. Промінь світла, що поширюється уздовж оптичного волокна, проводить своєрідне «опитування» хімічного покриття. При взаємодії з леткими компонентами запахів полярність оточення барвників змінюється і вони відповідають на стимул-реакцію відповідними змінами в спектрі флюоресценції.

Роздільність ліній збуджувального світла і флюоресцентного відгуку сенсора забезпечується або чисто спектральними, або спектрально-часовими методами. Перевага оптико-волоконних сенсорів полягає в комерційній доступності вельми великого асортименту флюоресцентних барвників, розроблених раніше для різних наукових і технічних застосувань. Це дає розробникам широкий асортимент покриттів і дозволяє реалізувати різні типи ОВС-приладів. До недоліків ОВС-технології слід віднести певну складність приладів цього типу в цілому: необхідність в стабілізованому джерелі збуджувального світла, монохроматорі, детекторі і ін., що збільшує вартість пристрою, його енергоспоживання і масогабаритні характеристики. Слід також згадати, що значне число флюоресцентних барвників має обмежений час життя, що пов'язано з їх фотодеструкцією.

Таким чином, аналіз відомих типів мультисенсорів газів показав, що найбільш дешевими, технологічними і широко використовуваними є метал-оксидні сенсори, які видають сукупність аналогових сигналів (напруг або струмів), залежних від часу. Зміна вихідних параметрів від часу відбувається шляхом лінійної зміни в часі температури мультисенсора при його експозиції досліджуванним газом. Кількість чутливих елементів в мультисенсорі може бути будь-якою (частіше всього від 3 до 15). Значить, нейроподібні засоби, що розробляються, мають бути пристосовані для розпізнавання сукупності аналогових сигналів, змінних в часі. У загальному випадку вихідні сигнали всіх відомих мультисенсорів газів можна звести до вигляду сукупності аналогових сигналів, залежних від часу.

1.3 Методи розпізнавання сигналів мультисенсорів газів

Аналіз патентної і науково-технічної літератури показав, що всі вживані на сьогодні методи розпізнавання сигналів мультисенсорів газів можна розділити на такі види:

- кореляційно-екстремальні [24, 25];
- на основі експертних систем [26, 27];
- на основі нейроподібних систем [14–18, 28–31].

Дослідженням і розробкою систем розпізнавання газів займаються в багатьох наукових центрах світу. Такі дослідження проводяться, наприклад, фірмою Electronic Sensor Technology [16], у ФІАН ім. Лебедева і на біофаку МГУ [32] (проф. Королев А. М.), в Гарвардському університеті [32] (Дж. Гартнер), у Воронежській технологічній академії [21] (проф. Коренман Я. І.), в ІК НАН України [28, 33–36], в Лестерському університеті (Великобританія) [32], в Іллінойському технологічному інституті [32] і Пенсільванському університеті [32, 37] (США) і ін.

Проаналізуємо відоміші з них.

У 1997 компанія Electronic Sensor Technology [14], Newbury Park, Каліфорнія першою почала комерційне виробництво «електронного носа» GC/SAW або аналізатора пари хімічних сполук, виконаного на базі швидкісної газової хроматографії, технології розпізнавання обра-

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-407-9>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-407-9>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-407-9>

Наукове видання

Колесницький Олег Костянтинович

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ
МУЛЬТИСЕНСОРІВ ГАЗІВ НА ОСНОВІ
ІМПУЛЬСНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено О. Колесницьким

Підписано до друку 11.04.2011 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,93
Наклад 100 прим. Зам № 2011-086

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 у Вінницькому національному
технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.