

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. Петух, 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

Нейромережеві 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 багатокомпонентними 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 нейромережеві 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 нейромережеві 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 нейромережеві 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 ефективно розв'язання задачі розпізнавання сигналів мультисенсорів в загальній постановці дозволить знайти ключ до підвищення ефективності розв'язання багатьох практичних завдань.

Прикладом практичного застосування нейромережових 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 нейромережових 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 нейромережові 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 швидко 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 організовуються 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, обґрунтовано 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 методичку 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 обґрунтованим 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, дифтерит, 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 отруень 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 багатокomпонентних 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.

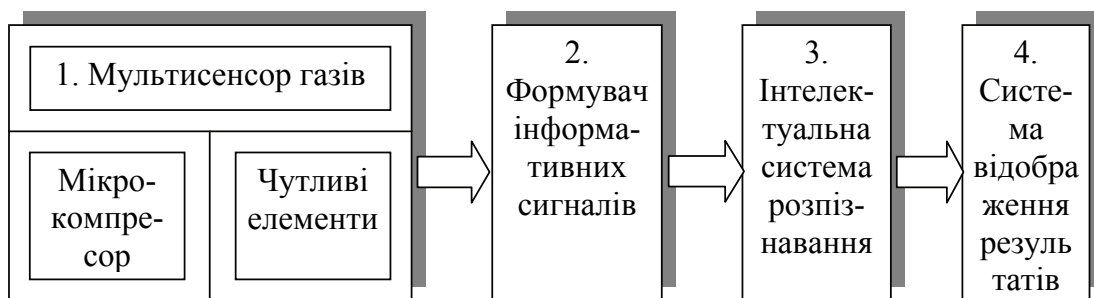


Рис. 1.1. Структурна схема системи розпізнавання сигналів мультисенсорів газів

Результати роботи системи розпізнавання відображуються 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 заздалегідь 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 налазці 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 різницевому 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 компонуванні 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 досліджуваному 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. Королєв 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-

ЛІТЕРАТУРА

1. Колесницкий О. К. Пути совершенствования методов и средств распознавания газов для медицинской и экологической диагностики / О. К. Колесницкий, Самра Муавия Хамо // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2007. — № 1–2(5–6). — С. 154—162.
2. Kolesnytskyj O. K. Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices / O. K. Kolesnytskyj, I. V. Bokotsey, S. S. Yaremchuk // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics), 2010. — Vol.19. — № 2. — P. 154—165.
3. Колесницкий О. К. Совершенствование методов распознавания газов для медицинской диагностики и экологического мониторинга / О. К. Колесницкий, Самра Муавия Хамо // Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка–ОДС 2005»: третя міжнар. наук.-техн. конф., 27—28 квітня 2005 р. : тези доп. — Вінниця, 2007. — С. 176—177.
4. Колесницкий О. К. Метод распознавания многомерных временных рядов при помощи импульсных нейронных сетей / О. К. Колесницкий, Самра Муавия Хамо // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2006. — №2(6). — С. 86—93.
5. Колесницкий О. К. Метод распознавания совокупности сигналов при помощи импульсных нейронных сетей / О. К. Колесницкий, Самра Муавия Хасан Хамо // Интеллектуальный анализ информации ИАИ–2006: VI междунар. конф., 16—19 мая 2006 г.: сб. трудов. — К., 2006. — С. 155—165.
6. Распознавание сигналов газовых мультисенсоров с использованием импульсной нейронной сети / [О. К. Колесницкий, С. И. Лукаш, Самра Муавия Хасан Хамо, И. Д. Войтович] // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології СЕМСТ—2: 2-а міжнар. наук.-техн. конф., 26—30 червня 2006 р. : тези доп. — Одеса, 2006. — С. 249.
7. Колесницкий О. К. Оптоэлектронная реализация импульсной нейронной сети / О. К. Колесницкий, В. П. Кожемяко, Самра Муавия Хасан Хамо // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2005. — № 2. — С. 134—138.
8. Колесницкий О. К. Использование системы распознавания запахов для безопасности корабля / О. К. Колесницкий, С. И. Лукаш, Самра Муавия Хасан Хамо // Интеллектуальні системи прийняття рішень та прикладні ас-

пекти інформаційних технологій ISDMIT'2006.: наук.-практ. конф., 26—30 червня 2006 р.: тези доп. — Євпаторія, 2006. — Т. 2. — С. 217—222.

9. Колесницкий О. К. Экспериментальные исследования интернейронов на биспин-приборах для импульсных нейронных сетей / О. К. Колесницкий, Самра Муавия Хассан Хамо, С. М. Богатчук // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета, 2006. — С. 67—75.

10. Колесницкий О. К. Экспериментальные исследования интернейронов на биспин-приборах для импульсных нейронных сетей / О. К. Колесницкий, Самра Муавия Хассан Хамо, С. М. Богатчук // Информационные технологии в научных исследованиях и учебном процессе: II междунар. научно-практ. конф., 14—16 ноября 2006 г.— Алчевск, 2006. — Т.1. — С. 161—163.

11. Колесницкий О. К. Оптоелектронна імпульсна нейронна мережа / О. К. Колесницький, О. Ф. Карбовський, І. В. Бокоцей // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: матеріали міжнародної наукової конференції. Том 2. — Херсон : ХНТУ, 2009. — С. 243—248.

12. G. C. Green An investigation in the suitability of using three electronic nose instruments for the detection and discrimination of bacteria types [Електронний ресурс] / G. C. Green, A. D. C Chan, R. A. Goubran// Presentation at IEEE EMBC conference 2006. — Режим доступу : <http://www.alpha-mos.com/en/index.php>

13. Ганшин В. М. От обонятельных моделей к «электронному носу» / В. М. Ганшин, А. В. Фесенко, А. В. Чебышев // Новые возможности параллельной аналитики. Специальная техника, 1999. — № 1. — С. 127.

14. Staples Edward J. The Electronic Nose. A New Law Enforcement Tool / Edward J. Staples // ONDCP international technology symposium, March 8—10, 1999. — Washington, DC, USA, 1999. — P. 124—129.

15. Thierry Zesiger. SMart Nose®: the first mass spectrometry based artificial nose [Електронний ресурс] / Thierry Zesiger // Expert in volatile analysis, 2006. — Режим доступу: <http://www.smartnose.com>

16. Teong C. Lim. Znose® product line Model 4200 Portable zNose [Електронний ресурс] / Teong C. Lim // Electronic sensor technology. — Режим доступу : <http://www.estcal.com>

17. Jan Mitrovics. Gas sensors [Электронный ресурс] / Jan Mitrovics // Publications of the NOSE II standardisation groups, 2007. — Режим доступа : <http://www2.nose-network.org/webtutorial>
18. Gardner J. W. Electronic Noses — Principles and Applications. 1 ed. / J. W. Gardner, P. N. Bartlett. — Oxford : Oxford University Press, 1999. — 354 p.
19. Handbook of Machine Olfaction: Electronic Nose Technology. 1 ed. / [T. C. Pearce, S. S. Schiffman, H. T. Nagle, J. W. Gardner.]. — VCH—Wiley, 2003. — 587 p.
20. Nagle H. T. The How and Why of electronic Noses / H. T. Nagle, S. S. Schiffman, R. Gutierrez-Osuna // IEEE Spectrum, 1998. — Vol. 1. — № 2. — P. 22—34.
21. Коренман Я. И. Подходы к анализу пищевых продуктов. Разработка масс-чувствительных сенсоров / Я. И. Коренман, Т. А. Кучменко // Российский химический журнал, 2002. — Т. XLVI. — № 4. — С. 34—42.
22. Zhu L. Overview of Electronic Nose Technology for Flavor Analysis in Pharmaceutical Oral Liquid Formulations [Электронный ресурс] / L. Zhu, R. Seburg and E. Tsai // Pharmaceutical Research & Development, 2004. — P. 170. — Режим доступа : <http://www.znose.com>
23. Caldwell Dr. Transforming molecular diagnostics into practical, cost-effective testing solutions [Электронный ресурс] // University of Florida, 2006. — Режим доступа : <http://www.osmetech.com>
24. Путьятин Е. П. Обработка изображений в робототехнике / Путьятин Е. П., Аверин С. И. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с.
25. Webb A. Statistical Pattern Recognition. 1 ed. / A. Webb. — New York : Arnold Publishers, 1999. — 340 p.
26. Джексон Питер. Введение в экспертные системы / Питер Джексон; [пер. с англ. П. А. Бондарь]. — М. : Вильямс, 2001. — 624 с.
27. Морозов М. В. Экспертные системы: Курс лекций по дисциплине «Системы искусственного интеллекта» [Электронный ресурс] / М. В. Морозов // Марийский государственный технический университет — Режим доступа : http://www.marstu.mari.ru:8101/mmlab/home/AI/7_8/index.html#part_6#part_6
28. Принципы формирования пространства признаков для задачи распознавания газов в атмосфере при помощи программного обеспечения «Confor» / [Алерс Х., Гладун В. В., Лукаш Л. И. и др.] // Искусственный интеллект, 1999. — № 2. — С. 386—391.

29. Круг П. Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учебное пособие / П. Г. Круг. — М. : Издательство МЭИ, 2002. — 176 с.
30. Keller P. Three Neural Network Based Sensor System for Environmental Monitoring / Keller P., R. T. Kouzes, L. J. Kangas // Proceedings IEEE Electro94 Conference, 10–12 May 1994. — Boston, MA, USA. — P. 1261—1278.
31. Hirayama V. Embedded system to classificate heat power of a fuel gas and the quality of alcohol / V. Hirayama // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2004. — №1. — С. 44—48.
32. Толстой А. К. О чем говорят запахи? [Электронный ресурс] / А. К. Толстой. — Режим доступа :
http://www.zoohall.com.ua/leftframes/knigy/ocherk/3_5.htm
33. Лукаш С. И. Исследование изменения параметров сенсоров в устройстве газового анализатора в процессе измерений / С. И. Лукаш, Х. Алерс, Р. Райш // УСИМ. — 2001. — № 3. — С. 279—285.
34. Система для определения загрязненности окружающей среды вблизи бензозаправочных станций / [С. И. Лукаш, И. Д. Войтович, Х. Алерс, Р. Райш] // УСИМ. — 2001. — № 2. — С. 32—36.
35. Лукаш С. И. Компьютерная система определения ацетона в воздухе дыхания / С. И. Лукаш, В. Ю. Перетятко // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. — 2004. — № 3. — С. 121—128.
36. Лукаш С. И. Техника и технология анализа объектов для экологической и медицинской диагностики по запаху / С. И. Лукаш, О. К. Колесницкий, И. Д. Войтович // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. — 2006. — № 5. — С. 56—61.
37. Свечников С. В. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа / С. В. Свечников, В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко. — К. : Наукова думка, 1987. — 256 с.
38. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3: [учебное пособие для вузов] / А. И. Галушкин. — М. : ИПРЖР, 2000. — 528 с.
39. Maass W. Pulsed Neural Networks / W. Maass, C. M. Bishop. — Cambridge : MIT Press, 1999. — 384 p.
40. Бардаченко В. Ф. Таймерні нейронні елементи та структури : монографія / В. Ф. Бардаченко, О. К. Колесницький, С. А. Василецький. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 126 с.
41. Бардаченко В. Ф. Перспективи застосування імпульсних нейронних мереж з таймерним представленням інформації для розпізнавання

динамічних образів / В. Ф. Бардаченко, О. К. Колесницький, С. А. Василюцький // УСiМ. — 2003. — № 6. — С. 73—82.

42. What makes a dynamical system computationally powerful? / [R. Legenstein, W. Maass, S. Haykin and oth.] // *New Directions in Statistical Signal Processing: From Systems to Brain*. — Cambridge, MIT Press, 2007. — P. 127—154.

43. T. Natschläger. The «liquid computer»: A novel strategy for real-time computing on time series / T. Natschläger, W. Maass, and H. Markram // *Special Issue on Foundations of Information Processing of TELEMATIK*. — 2002. — Vol. 8(1). — P. 39—43.

44. Maass W. Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations / W. Maass, T. Natschläger, H. Markram // *Neural Computation*. — 2002. — Vol. 14(11). — P. 2531—2560.

45. Natschläger T. Computer models and analysis tools for neural microcircuits / W. Maass, T. Natschläger, H. Markram ; in edit. R. Kötter // *Neuroscience Databases. A Practical Guide*. Chapter 9. — Boston : Kluwer Academic Publishers, 2003. — P. 123—138.

46. Jaeger H. Harnessing nonlinearity: Predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication / H. Jaeger, H. Haas // *Science*. — 2004. — Vol. 5. — P. 78—80.

47. Таланчук П. М. Сенсоры в контрольно-измерительной технике / П. М. Таланчук, С. П. Голубков. — К. : Техника, 1991. — 175 с.

48. Самсонов С. Как воспринимаются запахи / Сергей Самсонов // *Наука и жизнь*. — 1988. — № 4. — С. 46—53.

49. Бабічев С. А. Автоматизована система технічної діагностики міцнісних характеристик металів на основі гібридних нейронних мереж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.13.06 [Електронний ресурс] / С. А. Бабічев. — Херсон, 2003. — 20 с. — Режим доступу : <http://www.nbu.gov.ua/ard/2003/03bsagm.zip>

50. Малакар Д. Оптический производственный контроль / под ред. Д. Малакара; пер. с англ. Е. В. Мазуровой и др. — М. : Машиностроение, 1985. — 400 с.

51. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: [учебник для вузов] / Сергиенко А. Б. — С-Пб. : Питер, 2006. — 307 с.

52. Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов: [уч. пособие] / Новиков Л. В. — С-Пб. : ООО «Модус+», 1999. — 152 с.

53. Колесницький О. К. Частотно-динамічні нейронні елементи (Огляд) / О. К. Колесницький, С. А. Василюцький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2002. — № 5. — С. 5—10.
54. Maass W. Fading memory and kernel properties of generic cortical microcircuit models / W. Maass, T. Natschläger, and H. Markram // *Journal of Physiology*. — 2004. Vol. 98(4—6). — P. 315—330.
55. Maass W. Temporal integration in recurrent microcircuits / W. Maass and H. Markram ; in edit. M. A. Arbib // *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. — Cambridge : MIT Press, 2003. — P. [2] 1159—1163.
56. Волоконная оптика и приборостроение / [Бутусов М. М., Галкин С. Л., Орбинский С. П., Пал Б. П.]. — Л. : Машиностроение, 1987. — 327 с.
57. Петровский Б. В. Большая медицинская энциклопедия / под ред. Петровского Б. В. — М. : Советская энциклопедия, 1981. — Т. 16. — 512 с.
58. Коган А. Б. Биологическая кибернетика: учебное пособие для вузов / под ред. А. Б. Когана. — М. : Высшая школа, 1977. — 458 с.
59. Fox C. A qualitative study of the Purkinje cell dendritic branchlets and their relationship to afferent fibres / C. Fox, J. Barnard // *J. Avator*. — 1957. — Vol. 9. — P. 299—316.
60. Шаповалов А. И. Ритмическая активность нейронов / А. И. Шаповалов // *Журнал высшей нервной деятельности*. — 1965. — Т. 15. — № 3. — С. 466—480.
61. Антомонов Ю. Г. Принципы нейродинамики / Ю. Г. Антомонов, Котова А. Б. — К. : Наукова думка, 1974. — 194 с.
62. Антомонов Ю. Г. Введение в структурно - функциональную теорию нервной клетки / Ю. Г. Антомонов, А. Б. Котова — К. : Наукова думка, 1976. — 263 с.
63. Ходжкин А. Нервный импульс / А. Ходжкин. — М. : Мир, 1965. — 216 с.
64. Гельфанд И. М. Модели структурно-функциональной организации некоторых биологических систем / И. М. Гельфанд, М. Л. Цетлин. — М. : Наука, 1966. — 354 с.
65. McCulloch W. S. A logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity / W. S. McCulloch and W. Pitts // *Bull. Mathematical Biophysics*. — 1943. — Vol. 5. — P. 115—133.

66. Rosenblatt R. Principles of Neurodynamics / R. Rosenblatt. — New York : Spartan Books, 1962. — 486 с.
67. Mortimer J. T. Motor Prosthesis / J. T. Mortimer. — Vernon : VPB, 1981. — 512 p. (Handbook of Physiology. The nervous system; Chapter 5).
68. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус — К. : Вища школа, 1986. — 238 с.
69. Spiking Neuron Models [Электронный ресурс] / Wulfram Gerstner and Werner M. Kistler // Single Neurons, Populations, Plasticity (Cambridge University Press, 2002). — Режим доступа : <http://diwww.epfl.ch/~gerstner/BUCH.html>
70. Кнаб О. Д. Биспин — новый тип полупроводниковых приборов / О. Д. Кнаб // Электронная промышленность. — 1989. — № 8. — С. 3—8.
71. Василецький С. А. Оптиелектронні частотно-динамічні нейронні елементи: — дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Василецький Сергій Анатолійович — Вінниця, 2003. — 146 с.
72. Василецький С. А. Математичне та комп'ютерне моделювання оптиелектронного частотно-динамічного нейронного елемента / С. А. Василецький, О. К. Колесницький // Оптиелектронні інформаційно-енергетичні технології. — 2001. — № 2. — С. 96—101.
73. Пространственные модуляторы света / [А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов]. — М. : Радио и связь, 1987. — 356 с.
74. Саймон Хайкин. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / Саймон Хайкин ; [пер. с англ.] — М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. — 512 с.
75. Ротштейн А. П. Проектирование бездефектных человекомашинных технологий / А. П. Ротштейн, П. Д. Кузнецов. — К. : Техніка, 1992. — 180 с.
76. Hertz J. Introduction to the Theory of Neural Computation / J. Hertz, A. Krogh, and R. G. Palmer. — Boston : Addison-Wesley Reading, Mass., 1991. — 432 p.
77. Комарцова Л. Г. Нейрокомпьютеры / Л. Г. Комарцова, А. В. Максимов. — М. : МГТУ, 2002. — 320 с.
78. Tyson Thomas. Biomorphie analog pulse-coupled neural circuits / Thomas Tyson / NASA Tech Brief. — 2001. — Vol. 25, No. 6. — P. 127—136.

79. Патент 22956А Україна, МПК⁷ А 61 В 1/18. Модель нейрона / Кожем'яко В. П., Колесницький О. К. Нізельський М. Б., Василецький С. А.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т — № 2000013751; заявл. 03.07.1997; опубл. 05.05.1998, Бюл. № 1.

80. Оптоелектронні пристрої на основі біспін — фотодетекторів / [В. П. Кожем'яко, О. К. Колесницький, С. А. Василецький та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1998. — № 2. — С. 33—39.

81. Ишанин Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов / Геннадий Григорьевич Ишанин. — Л. : Машиностроение, 1986. — 239 с.

82. Гуртов В. А. Полевые транзисторы со структурой металл — диэлектрик — полупроводник / Владимир Александрович Гуртов. — Петрозаводск, 1984. — 92 с.

83. Акаев А. А. Оптические методы обработки информации / А. А. Акаев, С. А. Майоров. — М. : Высш. шк., 1988. — 237 с.

84. Сихарулидзе Д. Г. Преобразователи изображений типа МДП — электрооптический материал / Д. Г. Сихарулидзе, Г. С. Чилая. — М. : Радио и связь, 1986. — 112 с. — (Массовая библиотека инженера «Электроника»).

85. Фишер Р. Нелинейные оптические устройства — основные элементы будущих цифровых оптических компьютеров / Р. Фишер, Р. Моллер // Квантовая электроника. — 1989. — Т. 16. — № 8. — С. 1723—1730.

86. Федоров В. Б. Оптические логические элементы для высокопроизводительных оптических процессоров / В. Б. Федоров // Квантовая электроника, 1990. — Т. 17. — № 12. — С. 1539—1545.

87. Дордоев С. З. Оптическая цифровая вычислительная техника / С. З. Дордоев // Зарубежная радиоэлектроника, 1989. — № 10. — С. 16—21.

88. Smart Vision Chip Fabricated Using Three Dimensional Integration Technology : (Scientific Conference «Neural Information Processing Systems») [Електронний ресурс] / [Н. Kurino, М. Nakagawa, К. W. Lee and oth.]. — Режим доступу : <http://www.cs.cmu.edu/Groups/NIPS/00papers-pub-on-web/KurinoNa-kagawaLeeNakamuraYamadaParkKoayanagi.pdf>

89. Стемповский А. КМОП-фотодиодные СБИС — перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки информации

/ А. Стемповский, В. Шилин // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2003. — № 2. — С. 14—20.

90. Convertible two-dimensional-three-dimensional display using an LED array based on modified integral imaging / [W. Cho, J. - H. Park, Y. Kim and oth.] // Opt. Lett. — 2006. — Vol. 31. — P. 2852—2854.

91. A VLSI Recurrent Network of Integrate-and-Fire Neurons Connected by Plastic Synapses With Long-Term Memory / [Elisabetta Chicca, Davide Badoni, Vittorio Dante and oth.] // IEEE Transactions on Neural Networks. — 2003. — Vol. 14, No. 5. — P. 212—219.

92. Dayan P. Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems [Электронный ресурс] / Dayan P. and Abbott L. — MIT Press, 2001. — Режим доступа:

<http://people.brandeis.edu/~abbott/book>

93. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга / Ф. Розенблатт; [пер. с англ. В. Я. Алтаева и др.]; под ред. С. М. Осовцева. — М. : Мир, 1965. — 480 с.

94. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети: Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. — [2-е изд.]. — М. : Горячая линия-Телеком, 2002. — 382 с.

95. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Ф. Уоссермен. — М. : Мир, 1992. — 240 с.

96. Кожемяко В. П. Оптоэлектронные логико-временные вычислительные среды / Владимир Прокофьевич Кожемяко. — Тбилиси : Мецниереба, 1984. — 357с.

97. Вінцюк Т. К. Образний комп'ютер: концепції, методологія, підходи / Т. К. Вінцюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2001. — № 1. — С. 125—138.

98. Резник А. М. Оптоэлектронный нейрокомпьютер / А. М. Резник, М. Э. Куссуль // УСиМ. — 1993. — № 5. — С. 6—12.

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.