

## Твердотельная электроника

УДК 621.318.23, 621.3.084.2, 543.27.08

І.С. Дейнека, О.В. Борисов, канд. техн. наук

### Магнітні датчики концентрації кисню в газових сумішах – традиційні конструкції та сучасні технології виготовлення твердотільних первинних перетворювачів

Приведено описание методов измерения концентрации газообразного кислорода, основанных на использовании его магнитных свойств. Описаны структура и параметры современных твердотельных первичных преобразователей магнитных датчиков кислорода, перечислены их основные преимущества и недостатки.

The description of methods for measuring concentration of gaseous oxygen, based on the utilization of its magnetic properties, is given. Structures and parameters of modern magnetic solid-state oxygen sensors are described; basic advantages and disadvantages are listed.

**Ключевые слова:** магнитный датчик кислорода, термомагнитная конвекция, газоанализатор, твердотельный первичный преобразователь.

#### Вступ

Моніторинг складу газових сумішей сьогодні є надзвичайно актуальною задачею в промисловості, медицині, лабораторних дослідженнях. Вимірювання концентрації газоподібного кисню як основної складової повітря представляє як науковий, так і техніко-економічний інтерес [1, 2].

Найпоширенішими датчиками концентрації кисню в газовій суміші є хімічні первинні перетворювачі. Основними перевагами хімічних датчиків кисню є їх висока вибірковість та чутливість, порівняно низька вартість. Проте такі датчики мають нестабільну в часі передавальну характеристику, пов'язану з поступовою деградацією чутливого шару, а також великий час відгуку [1 - 3]. До того ж, хімічні датчики мають низьку стійкість до агресивних газових середовищ (наприклад, до таких, що містять хлор або фтор). Перераховані недоліки вимагають від користувача частого калібрування датчиків, заміни чутливого шару первинного перетворювача (ПП), установки додаткових фільтрів у вимірювальному каналі [2].

Цих недоліків позбавлені магнітні датчики концентрації кисню, що поділяються на магнітно-

механічні, магнітно-пневматичні та термомагнітні [4]. Такі датчики працюють на основі використання магнітних властивостей кисню, який, будучи парамагнетиком, втягується в область сильного неоднорідного магнітного поля. Явище втягування парамагнітного газу в області з високою напруженістю магнітного поля отримало назву «термомагнітної конвекції» та вперше було детально описано в [4]. Магнітні властивості кисню стисло оглянуто в роботі [5]. Детальне пояснення причин наявності магнітних властивостей газоподібного кисню з точки зору будови молекули наводиться в [6]. Основний параметр кисню, значення якого суттєво відрізняється від параметрів інших газів, це об'ємна магнітна сприйнятливість [7, 8]. Ця особливість газоподібного кисню служить основою для створення магнітних датчиків концентрації O<sub>2</sub>.

Наукові статті та описи до патентів, які стосуються магнітних датчиків концентрації кисню [9 - 11], містять дані про окремі структури ПП та їх основні характеристики. Проте авторам не відомі літературні джерела, в яких було б викладено повну інформацію про сучасні магнітні датчики концентрації кисню. До того ж, в переліку датчиків концентрації кисню в діючих нормативних документах магнітні газоаналізатори взагалі не згадуються [12 - 13].

Метою даної роботи є систематизація основних відомостей про найпоширеніші датчики газоподібного кисню, що працюють на принципі використання його магнітних властивостей.

#### 1. Магнітно-механічні датчики концентрації кисню

В більшості сучасних датчиків концентрації кисню, робота яких основана на його магнітних властивостях, в якості ПП використовується так званий магнітно-механічний осередок (рис. 1 а).

Чутливим елементом такого ПП є гантелеподібне тіло, яке складається з двох сфер 1, заповнених азотом. Тіло закріплено на тонкій платиновій нитці 2. За допомогою постійних магнітів 3 навколо чутливого елемента створюється неоднорідне магнітне

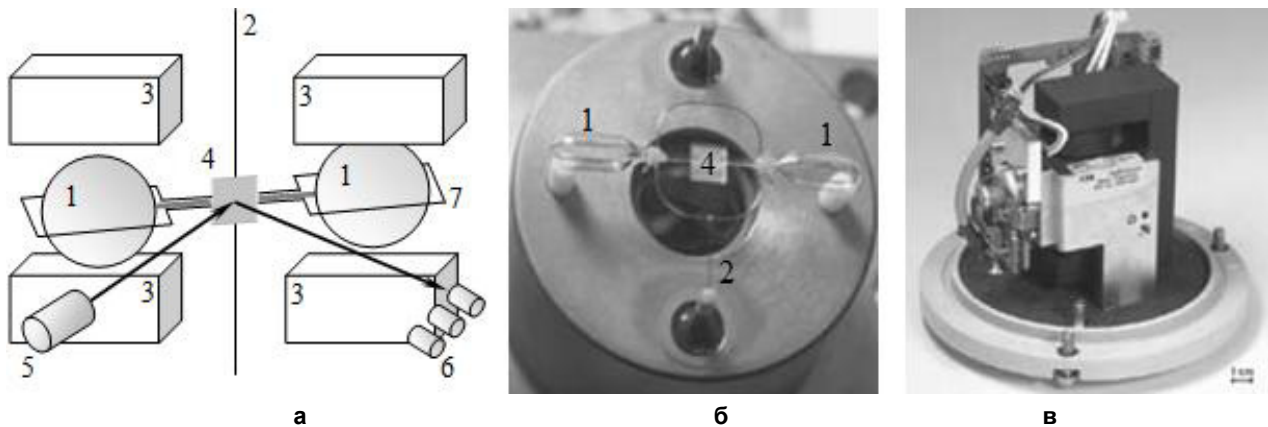


Рис.1. Магнітно-механічний датчик «Magnos206» виробництва компанії «ABB» (ФРН): а – Схематичне зображення структури ПП датчика; б – фотознімок ПП [3]; в – загальний вигляд датчика [3]

поле. На осі обертання тіла встановлено дзеркало 4, на яке спрямовується промінь світла від джерела випромінювання 5. Відбите світло направляється на фотоприймачі 6. На сфери намотана магнітна котушка 7 з тонкого дроту.

Виготовлення ПП відбувається вручну, тому вимагає великих часо- та трудо-затрат [3].

Фотознімок ПП магнітно-механічного датчика концентрації кисню з струмовим зворотним зв'язком показано на рис.1 б. Коли в середовищі навколо гантелеподібного тіла міститься такий самий газ, як і всередині сфер – тіло знаходиться в положенні рівноваги. Як тільки концентрація кисню в оточуючому середовищі підвищується, за рахунок його втягування в область сильного неоднорідного магнітного поля відбувається зміщення сфер з їх початкового положення. Коли гантелеподібне тіло починає рухатись, його рух детектується оптичною системою, яка керує підсилювачем, що спрямовує струм на магнітну котушку для залишення тіла у вихідній «нульовій» позиції. Величина цього струму пропорційна до концентрації кисню в робочій камері датчика. Основні дані для розрахунку вихідного сигналу магнітно-механічного датчика концентрації кисню з урахуванням його магнітних та геометричних характеристик наведено в [4].

Фотознімок сучасного магнітно-механічного датчика концентрації кисню «Magnos206» з струмовим зворотним зв'язком виробництва компанії «ABB» наведений на рис.1 в. Основними перевагами традиційних магнітно-механічних датчиків концентрації кисню є:

- малий час відгуку (у порівнянні з хімічними датчиками) – до 3-х секунд [3, 14];
- лінійність вихідного сигналу [14];
- тривалий термін служби (до 10 років [3]).

Основними недоліками магнітно-механічних датчиків концентрації кисню описаної конструкції є механічна ламкість, чутливість до розташування в просторі та вібрацій, складність системи і її висока вартість, а також невисока повторюваність характеристик від зразка до зразка [4].

На рис. 2 показано структуру твердотілого ПП магнітно-механічного датчика концентрації кисню, виготовленого за технологією МЕМС [15]. Структура ПП включає твердотільний чутливий елемент 1, несучу рамку 2, кріплення 3 та два постійних магніти 4. Чутливий елемент, рамку та кріплення виготовлено з кремнію з використанням мікроелектронної технології, методів фотолітографії та іонного травлення. Для захисту від корозії під впливом оточуючого середовища всі основні частини ПП пропонується покривати окислом або нітридом кремнію. Розміри твердотілого чутливого елемента, зазначені в [15]: довжина – 2...15 мм, ширина 0,5...3 мм, товщина 0,1...2 мм.

Чутливий елемент складається з двох порожніх всередині тіл (2 – а та 2 – б), виготовлених у формі паралелепіпедів. Тіла з'єднуються за допомогою кремнієвої перемички 2 – в, ширина якої складає 0,2 мм. Товщина стінок твердотілого чутливого елемента становить порядку 0,1 мм, проте вона може підбиратися окремо для кожного випадку із міркувань щодо величини моменту

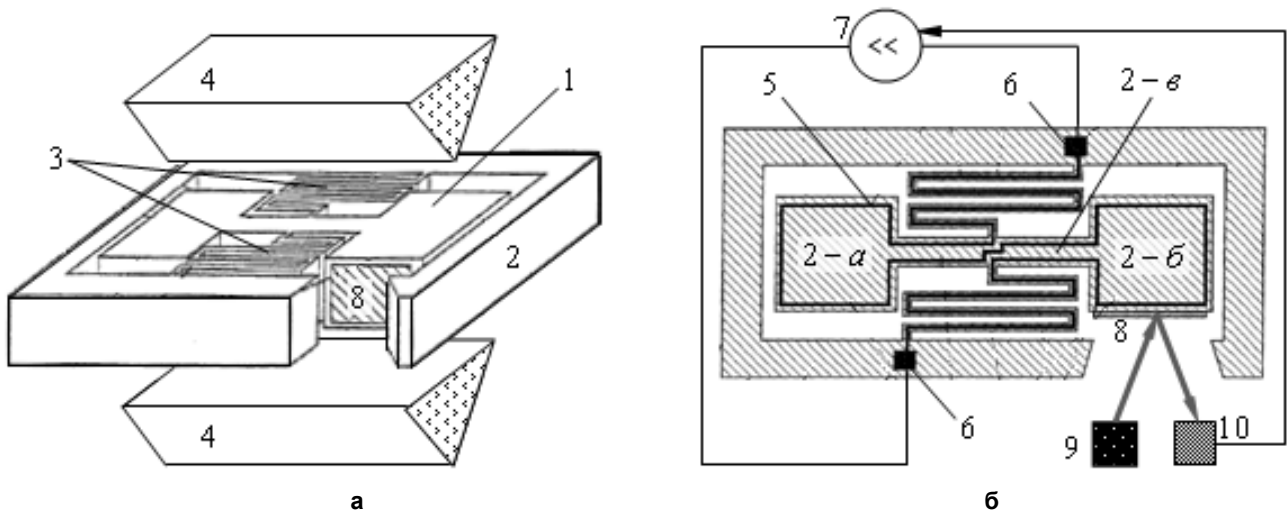


Рис.2. Структура твердотельного ПП магнітно-механічного датчика концентрації кисню, запропонована авторами [15]: а – вигляд збоку; б – горизонтальний переріз

інерції чутливого елемента. Чутливий елемент розміщується в підтримуючій рамці, розміри якої дозволяють йому вільно обертатися навколо вісі, що проходить через центр мас чутливого елемента. Кут відхилення чутливого елемента від положення рівноваги має становити як мінімум 30°. Чутливий елемент прикріплено до рамки за допомогою пружних кріплень, виготовлених у формі меандрів.

На поверхні чутливого елемента формуються струмопровідні доріжки 5 (методом напилювання у вакуумі або дифузії домішок в кремній). Вони виконують роль магнітної котушки та виготовляються з золота, срібла, міді чи алюмінію. До контактних площадок 6 під'єднується джерело струму 7. На одній стороні чутливого елемента формується відбиваюче покриття 8, на яке від джерела світла 9 падає промінь видимого світла. Відбите світло потрапляє на фотоприймач 10, який керує джерелом струму 7. Принцип роботи ПП подібний до функціонування об'ємного магнітомеханічного ПП датчика концентрації кисню в газовій суміші. Як тільки концентрація кисню в зазорі між магнітами зростає, чутливий елемент починає зміщуватись з вихідного положення. Цей рух реєструється фотоприймачем, вихідний сигнал якого визначає величину струму, що проходить через струмопровідні доріжки. За рахунок протікання струму через магнітну котушку виникає додаткове магнітне поле, яке утримує чутливий елемент в положенні рівноваги.

Спеціалістами компанії «ABB» біло розроблено та виготовлено магнітно-механічний датчик концентрації кисню з використанням MEMS – технології. Фотознімок такого датчика показано на рис.3 а.

ПП цього датчика є твердотільна кремнієва структура, зовнішній вигляд якої наведено на рис.3 б. Процес виготовлення ПП складається з двох основних етапів. Спочатку на кремнієвій пластині за допомогою осаджування металу з наступним його структуруванням створюється магнітна компенсаційна система. Після цього методом глибокого іонного реактивного травлення кремнієва пластинка протравлюється наскрізь.

Час відгуку створеного твердотельного магнітно-механічного датчика концентрації кисню становить 1,3 с, абсолютна похибка при зміні швидкості потоку від 20 л/год до 60 л/год є меншою, ніж  $\pm 0,015\%$  [3].

## 2. Магнітно-пневматичні датчики концентрації кисню

Конструкція ПП магнітно-пневматичного датчика концентрації кисню показана на рис.4. Основою конструкції такого датчика служить С – подібний електромагніт, в зазорі якого розміщується вимірювальна комірка. Через комірку прокачується газова суміш. В момент ввімкнення магнітного поля молекули кисню притягаються до зазору електромагніту подібно до маленьких магнітів. Це викликає тимчасове збільшення тиску повітря в зазорі. Надмірний тиск зникає, коли магнітне поле вимикається.

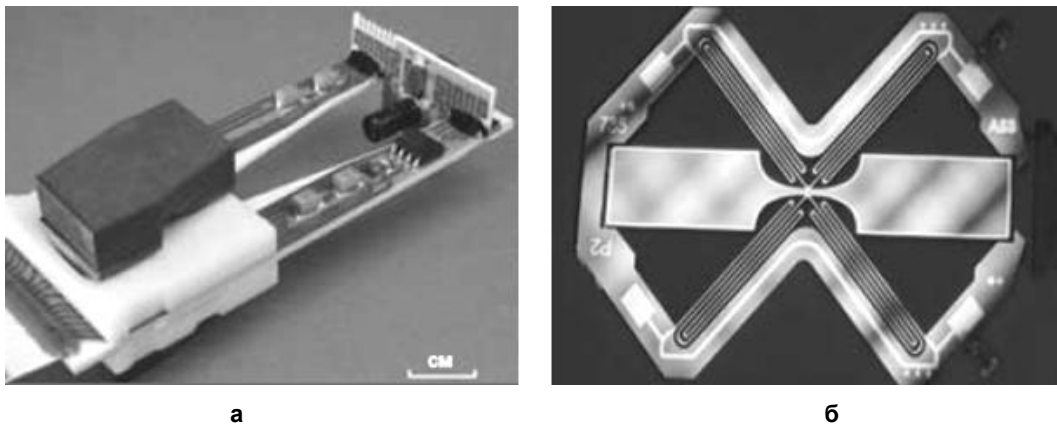


Рис.3. Твердотільний магнітно-механічний датчик, створений спеціалістами компанії «АВВ» [3]: а – Зовнішній вигляд; б – ПП датчика

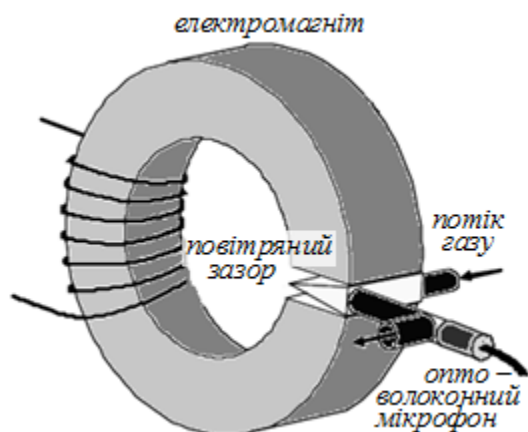


Рис.4. Структура магнітно-пневматичного датчика концентрації кисню в газовій суміші [16]

Коли електромагніт керується змінним електричним струмом частотою 60 Гц, скорочення і «розслаблення» повітря, яке знаходиться в зазорі електромагніту, випромінює акустичний сигнал з частотою 120 Гц. Подвоєння частоти обумовлено тим, що кисневі молекули притягуються до зазору електромагніту незалежно від полярності магнітного поля. У кожному циклі інтенсивність магнітного поля досягає максимуму та мінімуму двічі. Акустичний тиск, що виникає в зазорі електромагніту, пропорційний до величини концентрації молекул кисню біля зазору. За допомогою детектування акустичного сигналу чутливим мікрофоном може бути визначена концентрація кисню.

В найсучасніших конструкціях магнітно-пневматичних датчиків концентрації кисню в якості чутливого елемента використовується оптичний волоконний мікрофон [16].

На практиці досить часто використовують диференційний магнітно-пневматичний дат-

чик концентрації кисню, конструкція якого показана на рис.5.

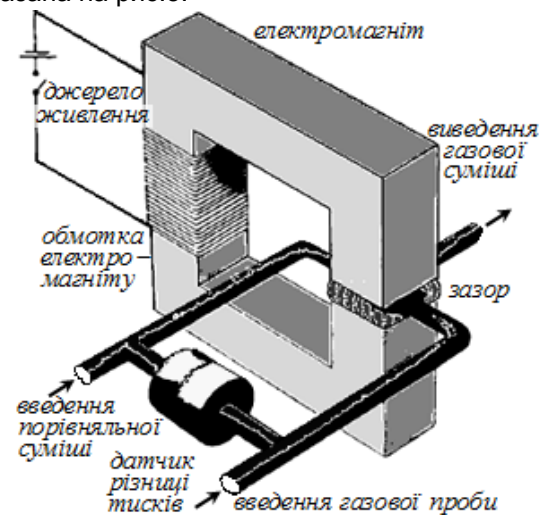


Рис.5. Конструкція диференційного магнітно-пневматичного датчика концентрації кисню [17]

Товщина повітряного зазору сучасних диференційних магнітно-пневматичних датчиків концентрації кисню складає 0,2 мм [17]. Основна проблема таких датчиків – вплив механічних вібрацій магнітної системи на ПП. Через це стабільність вихідного сигналу таких датчиків становить 0,3...0,5% [16, 17]. Недоліком подібних датчиків концентрації кисню є також невисока чутливість до невеликих (менше 20%) концентрацій кисню [16].

### 3. Термомагнітні датчики концентрації кисню

Термомагнітний метод аналізу складу газової суміші оснований на явищі термомагнітної конвекції (ТМК) в магнітному полі за наявності в ньому градієнтів напруженості та температури. Під ТМК розуміють конвекцію газу, який оточує

розігріте тіло, розміщене в неоднорідному магнітному полі [4].

В якості нагрівача в традиційних термомагнітних датчиках концентрації кисню використовується платинова або вольфрамова спіраль, через яку пропускається електричний струм. За рахунок розсіювання потужності на спіралі прогрівається газова суміш навколо неї, внаслідок чого виникає природна конвекція. В потоці розігрітого газу розміщується чутливий елемент - терморезистор, опір якого залежить від температури. Чим вища концентрація кисню в газовій

суміші, тим активніше переноситься тепло від нагрівача до чутливого елемента, і тим більше змінюється його електричний опір.

Сьогодні існує багато різних конструкцій ПП термомагнітних датчиків концентрації газоподібного кисню, найбільш часто в літературних джерелах згадуються варіанти, показані на рис.6, де 1 – постійні магніти, 2 – нагрівач, 3 – терморезистор, 4 – канал прокачування газової суміші. Стрілками показано напрями вимушеного потоку та потоку, який виникає завдяки ТМК.

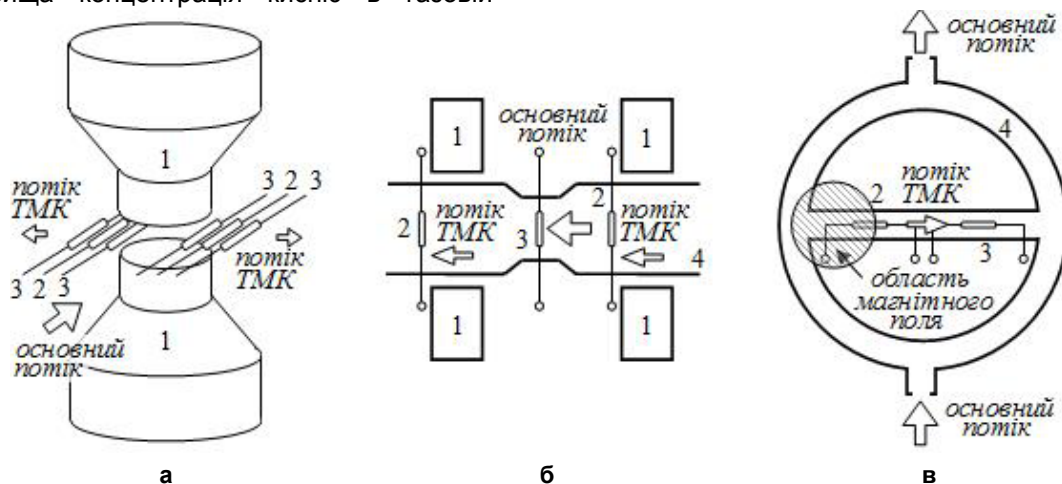


Рис.6. Традиційні конструкції ПП термомагнітних датчиків концентрації кисню: а – Безканалний термомагнітний датчик концентрації кисню [9]; б – Датчик кисню з каналом та двома парами магнітів [10]; в – Термомагнітний датчик з кільцеподібною камерою [11].

На практиці для визначення концентрації газоподібного кисню термомагнітним методом використовуються більш складні конструкції ПП (рис.7). Потік газової суміші потрапляє в вимірювальну камеру 1. Під вимірювальною камерою розміщено постійний магніт 2. В камері газова суміш прогрівається за рахунок пропускання електричного струму через нагрівачі 3.

За наявності градієнта магнітного поля всередині вимірювальної камери виникають потоки ТМК, що призводить до зміни опорів пари термісторів 4, ввімкнених в міст Уїтстона.

Вихідний сигнал через підсилювач та АЦП поступає до мікроконтролера, який розраховує концентрацію кисню в суміші [18].

Останнім часом почали з'являтися наукові роботи [19] та патенти [20] на винаходи, автори яких все більше уваги приділяють розробці твердотільних термомагнітних датчиків концентрації кисню. В 2010 році до Патентного бюро США Йорг Мюллер та Стефан Вондершмідт з компанії «M&S Tech Group Germany» подали заяву щодо захисту прав

інтелектуальної власності на ПП [21], структура якого показана на рис.8 а. ПП має три канали (основний, вимірювальний та порівняльний), по яких протікає газова суміш. За допомогою неоднорідного магнітного поля потік газової суміші, що містить кисень, перерозподіляється по каналам в залежності від концентрації кисню.

Принцип роботи ПП полягає у наступному. Газова суміш через вхідний отвір 1 проходить повз нагрівач 2, за допомогою якого можна змінювати магнітну проникність кисню та таким чином проводити калібрування датчика, і потрапляє в камеру 3. За допомогою магнітного поля, яке створюється постійним магнітом 4, потік газу, який містить кисень, розподіляється по трьох каналах.

Суміш, яка пройшла через порівняльний (5), головний (6) та вимірювальний (7) канали, виходить через отвори 8. Швидкість потоків в каналах вимірюється за допомогою термометрів опору, виготовлених за технологією МЕМС (9). Коли процентний вміст кисню в суміші дорівнює нулю, основна частина потоку проходить через головний канал

6. В такому випадку швидкості потоків в вимірювальному та в порівняльному каналах однакові. Якщо концентрація кисню в суміші зростає, це викликає перерозподіл газових потоків: через вимірювальний канал протікатиме більша частина суміші, ніж через порівняльний канал. Термометри опору, розміщені в вимірювальному та у порівняльному каналах, включені в міст Уїтстона. Вихідний сигнал ПП не залежить від температури оточуючого середовища.

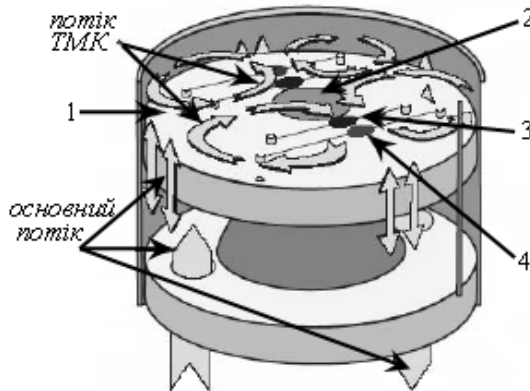


Рис.7. Конструкція ПП сучасного термомагнітного датчика концентрації кисню «АРХ» виробництва компанії «GE Sensing» (США) [18]

Процес виготовлення запатентованого ПП включає декілька основних етапів [22]. Спочатку на скляну підкладку (рис.8 б) за допомогою процесу хімічного осадження з газової фази за зниженого тиску (LPCVD) осаджується шар полікристалічного кремнію

(poly-Si). Потім на цей шар методом напилювання у вакуумі наносяться шари вольфраму (W) та платини (Pt). Термометри опору та нагрівач виготовляються методом травлення платинові шару у плавикової кислоти (HF) з використанням шару полікристалічного кремнію в якості захисної маски. Стінки та кришки каналів виготовляються з кремнію (Si). Кремнієва пластина травиться знизу на глибину 50 мкм вдосконаленим методом травлення кремнію (ASE-process). Після цього підтравлена пластина прикріплюється методом анодного приєднання (Anodic bonding method) до скляної підкладки. Нарешті, кремнієва пластина протравлюється наскрізь; таким чином, на скляній підкладці залишаються лише ті полоси кремнію, які формують стінки каналів. Процес виготовлення ПП завершується закриванням каналів верхньою кремнієвою пластиною.

Фотознімок ПП твердотілого термомагнітного датчика концентрації кисню, виготовленого за описаною технологією фірмою «Mikro System Technik», ФРН, наведено на рис.9 а. На рис.9 б представлено фотознімок чутливого елемента ПП, який складається з трьох резисторів. Середній резистор використовується в якості нагрівача, а два інших включаються в плечі мосту Уїтстону.

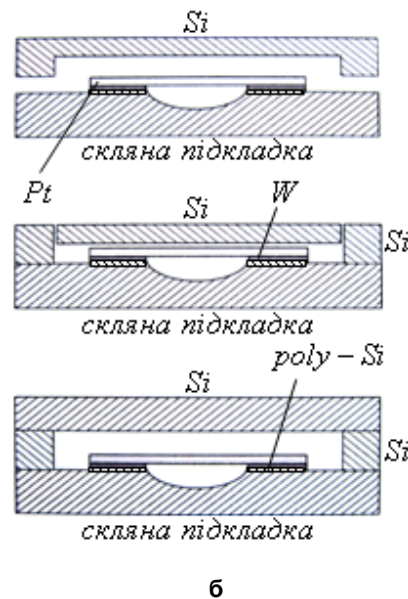
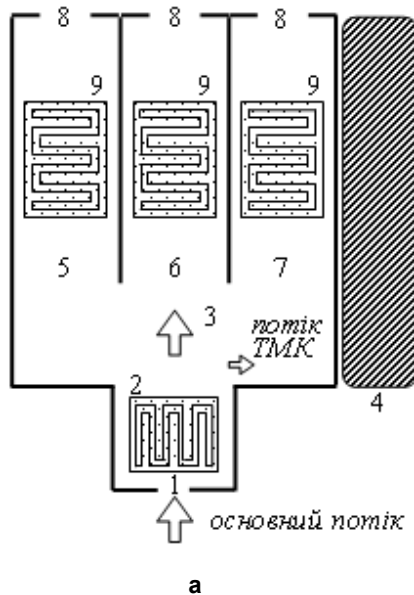


Рис.8. Структура твердотілого ПП термомагнітного датчика концентрації кисню: а – Схема трьохканального ПП [21]; б – основні етапи виготовлення ПП [22]

На рис.10 а показана залежність вихідного сигналу мосту Уїтстона від часу при почерговій подачі в вимірювальний канал чистого кисню та чистого азоту. На рис.10 б наведена залежність вихідного сигналу мосту

від часу при поступовому збільшенні концентрації кисню в газовій суміші.

За рис.10 а можна зробити висновок про наявність помітної інерційності розробленого мікроелектронного датчика, а з рис.10 б – оцінити його чутливість.

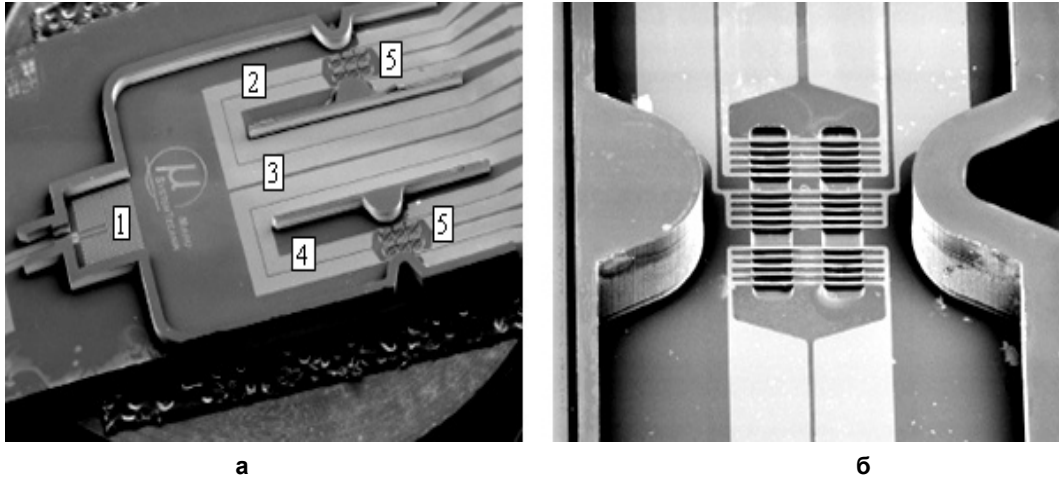


Рис.9: Фотознімки, зроблені за допомогою СЕМ [22]: а – ПП термомагнітного датчика концентрації кисню: 1 – нагрівач; 2, 3, 4 – вимірювальний, основний та порівняльний канали відповідно, 5 – чутливий елемент; б – фотознімок чутливого елемента ПП

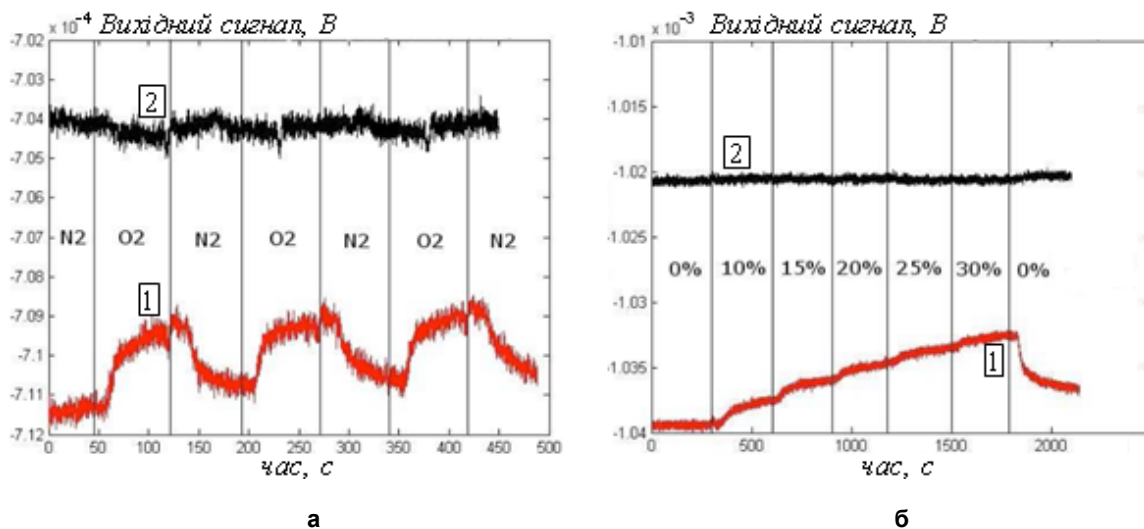


Рис.10: Залежність вихідного сигналу від часу [22]: а – при почерговій подачі в вимірювальний канал кисню та азоту (напруга живлення мосту 0,5 В); б – при збільшенні концентрації кисню в газовій суміші (напруга живлення мосту 1 В). 1 – з магнітним полем, 2 – без магнітного поля

За напруги живлення мосту Уїтстона 1 В чутливість датчика становить приблизно 17 мкВ/%. При цьому відношення сигнал/шум складає порядку 20 дБ. Малі значення чутливості та мале відношення сигнал/шум ставить високі вимоги до вторинного перетворювача датчика, а також вимагає прецизійної стабілізації швидкості потоку газової суміші в каналі. Основні параметри комерційно доступних термомагнітних датчиків концентрації кисню наведено в табл.1.2

Аналіз літературних джерел [3, 16 – 22] показує, що термомагнітні датчики концентрації кисню можуть використовуватись у медицині та промисловості. У майбутньому буде проведено детальний аналіз роботи сучасних термомагнітних датчиків з урахуванням їх геометричних, фізичних та електричних параметрів, вплив фонових газів на роботу ПП; на основі теоретичних розробок будуть дані рекомендації щодо покращення метрологічних та експлуатаційних характеристик термомагнітних датчиків.

Таблиця 2. Основні параметри сучасних магнітних датчиків концентрації кисню

Назва	Принцип роботи <sup>1</sup>	Виробник	Діапазон вимірювань%	Чутливість	Похибка <sup>2</sup>	Діапазон температур, °С	Споживана потужність, Вт	Час відгуку, с	Маса, г
MG8	ТМ	Yokogawa Electric Corporation, Японія	0 – 25	0,6 мА/%	В±2,5%	0...+ 60	35	3	850
Paracube Micro	ММ	Hummingbird, Великобританія	0 – 100	0,5 мВ/%	А<±0,2%	+5...+ 50	0,35	8...20	70
Pm1111E	ММ	Hummingbird	0 – 100	10 мВ/%	А<±0,1%	+5...+ 50	0,325	<0.20 (16%-21%)	420
Pm1158	ММ	Hummingbird	0 – 100	10 мВ/%	А<±0,1%	0...+ 65	0,4	<2.5	420
ДАМ	ТМ	АналитПрибор РФ	0 – 10 0 – 30	0,5 мА/%	П±7,5% ±2,5%	-10...+ 50	2,25	<90	<4700
PAROX 1200 Standart	ММ	МВЕ АГ Німеччина	0 – 5 0 – 100	10 мВ/%	-	0...+ 45	1,5	<3	650
Servomex 1900	ММ	Servomex Міжнародний концерн	0 – 100	10 мВ/%	А±0,05%	-10...+ 50	-	4	26-103
Teledyne 3020 М	ММ	Teledyne Analytical Instruments США	0 – 5 0 – 100	10 мВ/%	П±1%	0...+ 45	70 макс.	<10	9000
АРХ	ТМ	GE Panametrics Міжнародний концерн	0 – 25	0,5 мВ/%	А<±0,25%	0...+ 45	-	6	1800
Magnos 206	ММ	ABB Німеччина	0 – 100	0,5 мВ/%	-	+5...+ 50	50	3,5 - 10	125

<sup>1</sup> – ТМ – термомагнітний, ММ – магнітно-механічний

<sup>2</sup> – А – абсолютна, В – відносна, П – приведена

### Висновки

З-поміж різноманіття сучасних магнітних датчиків концентрації кисню вигідно виділяються термомагнітні датчики. У порівнянні з магнітно-пневматичними датчиками вони мають менший рівень власних шумів та більш просту й надійну конструкцію, ніж магнітно-механічні датчики.

Залишаються актуальними питання моделювання процесів, які протікають в термомагнітному датчику концентрації газоподібного кисню, а також питання покращення метрологічних характеристик та підвищення чутливості первинного перетворювача.

Традиційні методи вимірювання концентрації кисню вимагають

міждисциплінарного підходу до розробки первинних перетворювачів, що передбачає об'єднання знань з області фізики магнетизму, теплообміну вимушеною конвекцією, газової динаміки та електричних вимірювань. В доступній авторам літературі відсутні постановка та розв'язки комплексної задачі розробки термомагнітного первинного перетворювача концентрації кисню. Залишаються актуальними питання моделювання як окремих процесів, які протікають в первинному перетворювачі, так і його роботи в цілому.

Сучасні технології твердотільної електроніки дають можливість значної мініатюризації первинного перетворювача термомагнітних датчиків концентрації кисню. Використовуючи фотолітографію, можна до-



сягти високої відтворюваності характеристик як електричних, так і пневматичних компонентів первинного перетворювача за рахунок виняткової прецизійності форми. Слід очікувати значного зниження енергоспоживання з одночасним покращенням метрологічних характеристик первинного перетворювача саме у мікромеханічному виконанні.

### Література

1. *Pekka T. Merilainen*. A fast differential paramagnetic O<sub>2</sub>-sensor / Pekka T. Merilainen // International Journal of Clinical Monitoring and Computing 5: 1988, pp. 187-195.
2. *R. Kocache*. The measurement of oxygen in gas mixtures / Kocache R. // J. Phys. E: Sci. Instrum. 19, 1986, pp. 401 - 414.
3. *П. Криппнер, Б. Андрес, П. Сасс, Т. Бауэр, М. Ветцко* «Быстродействующий датчик кислорода для непрерывного анализа газа» // Микросистемы за работой. - 2006. - №4.- с. 69-73.
4. *Агейкин Д.И.* Магнитные газоанализаторы. М. – Л., Госэнергоиздат, 1963. - 216 с.
5. *Тамм И.Е.* Магнетизм и строение атомов. На правах рукописи. УФН, т. 5, вып. 1-2, 1925, с. 105-137.
6. *Молдавер Т.И.* Кислород. Популярная библиотека химических элементов. «Наука» М. 1983. с 113-130.
7. *Кулаков М.В.* Технологические измерения и приборы для химических производств. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
8. *Никольский Б.П.* Справочник химика, т. 4: Аналитическая химия, спектральный анализ, показатели преломления. Л.: Химия, 1967. – 461 с.
9. *Meyer Emilio*. Zero shift compensation oxygen sensor / Meyer Emilio / United States Patent № 6,389,880, May 21, 2002.
10. *Ryuuji Chiba*. Magnetic oxygen analyser / Ryuuji Chiba, Hideaki Yamagishi, Masauki Sato / United States Patent № 6.405.578, Jun. 18, 2002.
11. *Masato Maeda*. Paramagnetic oxygen analyser / Masato Maeda, Hideo Takeuchi / United States Patent № 4.860.574, Aug 29, 1989.
12. ДСТУ 2608-94. Аналізатори газів для контролю атмосфери. Загальні технічні вимоги та методи випробувань. Чинний від 01.07.95.
13. ДСТУ 2607-94. Системи вимірювальні газоаналітичні. Загальні технічні вимоги. Чинний від 01.07.95.
14. *Heikki Haveri*. Paramagnetic oxygen sensing apparatus and method / Heikki Haveri / United States Patent № 7.081.745, Jul. 25, 2006.
15. *P. Krippner, M. Wetzko, P. Szasz, B. Andres, T. Bauer*. MEMS based paramagnetic oxygen measurement – Proceedings of the 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems - Lion, France, 10 – 14 June 2007, pp. 2393 – 2396.
16. *Jun-Han Lee*. Design of an acousto-magnetic oxygen sensor / Jun-Han Lee, Cheng-Lun Tsai, Chi-Shyan Fann, Shyh-Hau Wang // Journal of medical and biological engineering, 2001-22(4), pp. 193-198.
17. *Pekka T. Merilainen*. A Differential paramagnetic sensor for breath-by-breath oximetry / Pekka T. Merilainen // Journal of Clinical Monitoring Vol 6 No 1 1990: pp. 65 – 74.
18. APX. – стационарный термомагнитный газоанализатор кислорода компании GE Panametrics. Технические характеристики и возможности. Доступ до ресурсу: [http://pergam-spb.ru/cms\\_editor/files/APX.pdf](http://pergam-spb.ru/cms_editor/files/APX.pdf).
19. *Z. Andjelic*. Simulation Based Design of O<sub>2</sub> MEMS Sensor / Z. Andjelic, P. krippner, A. Vogel // Nanotech 2002 Vol. 1 - Technical Proceedings of the 2002 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Chapter 5: MEMS Applications and Characterization.
20. *Richard Paul Kovachich*. Compact paramagnetic oxygen sensor / Richard Paul Kovachich, Colin Geoffrey Stocks, and others / UK Patent № 0821181.5, 19/11/2008.
21. *Jorg Muller, Stefan Vonderschmidt*. Device for determining the oxygen content of a gas / Jorg Muller / United States Patent № 0011159, Jan. 20, 2011.
22. *Stefan Vonderschmidt, Jorg Muller*. A novel Micro Paramagnetic Oxygen Sensor – Proceedings of the 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS – 2010), Wanchai, Hong Kong, 24 – 28 Jan., 2010, pp. 903 – 906. ISSN: 1084-6999, E-ISBN: 978-1-4244-5763-2.