

УДК 535.36:681.7.068

І.П. КРЕМЕР, О.Й. ШИМЧИШИН, М.С. ІВАХ

## **ДВОКАНАЛЬНА ОПТИЧНА СИСТЕМА РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛІВ РІДКОКРИСТАЛІЧНОГО СЕНСОРА ГАЗІВ**

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна*

**Анотація.** Представлено принцип побудови двоканальної оптичної системи реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора газів із спектральним розділенням каналів. Архітектура запропонованої системи базується на просторовому та спектральному розділенні оптичного сигналу на два незалежних канали, що уможливило одночасне отримання вимірювального та опорного сигналів від одного рідкокристалічного чутливого елемента без механічного перемикання або додаткових оптичних компонентів. Вимірювальний канал (500–600 нм) реєструє зміни у смугі селективного відбивання рідкокристалічного чутливого елемента, спричинені взаємодією з аналізованим газовим середовищем. Зсув та зміна інтенсивності смуги відбивання є основним інформативним параметром відгуку сенсора. Опорний канал (800 нм) функціонує поза зоною селективного відбивання і забезпечує ефективну компенсацію нестабільності джерела освітлення, а також зовнішніх оптичних завад і флуктуацій фонового освітлення.

Диференціальний метод нормування сигналів застосовано для усунення мультиплікативної складової нестабільності джерела. Такий підхід підвищує відношення сигнал/шум у 7–13 разів порівняно з одноканальною схемою, що суттєво покращує загальну достовірність вимірювань, довготривалу стабільність та відтворюваність показань сенсора за змінних умов навколишнього середовища.

Розроблено математичну модель двоканальної системи з урахуванням спектральних характеристик рідкокристалічного чутливого елемента, чутливості фотоприймачів та шумових складових кожного каналу. Проведено числове моделювання для перевірки запропонованої моделі та оптимізації ключових параметрів системи. Визначено основні метрологічні характеристики: робочий діапазон 0–80 ppm, межа виявлення  $LOD \approx 3,2$  ppm за рівня шуму фотодіодів  $\sigma_n \leq 0,5$  %, відносна похибка вимірювання  $\leq 2,5$ %. Отримані результати підтверджують ефективність двоканального підходу для підвищення чутливості, селективності та експлуатаційної стабільності оптичних газових сенсорів на основі рідких кристалів.

**Ключові слова:** рідкий кристал; рідкокристалічний чутливий елемент; двоканальна оптична система; диференціальний метод; газ; досліджуване середовище.

**Abstract.** The design principle of a dual-channel optical signal registration system for a liquid crystal gas sensor with spectral channel separation is presented. The architecture of the proposed system is based on the spatial and spectral decomposition of the optical signal into two independent channels, enabling the simultaneous acquisition of the measurement and reference signals from a single liquid crystal sensing element without mechanical switching or additional optical components.

The measurement channel (500–600 nm) records variations in the selective reflection band of the liquid crystal sensing element induced by interaction with the analyte gas environment. The spectral shift and intensity variation of the reflection band constitute the primary informative parameter of the sensor response. The reference channel (800 nm) operates outside the selective reflection band and provides effective compensation for illumination source instability, as well as external optical interference and ambient illumination fluctuations.

The differential signal normalization method is employed to eliminate the multiplicative component of source instability. This approach improves the signal-to-noise ratio by a factor of 7–13 relative to a single-channel configuration, substantially enhancing the overall measurement reliability, long-term stability, and reproducibility of sensor readings under varying environmental conditions.

A mathematical model of the dual-channel system has been developed, accounting for the spectral characteristics of the liquid crystal cell, the photodetector responsivity, and the noise contributions of each individual channel. Numerical simulation was performed to validate the proposed model and to optimize the key system parameters.

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

---

---

The principal metrological characteristics were determined as follows: operating range 0–80 ppm, limit of detection LOD  $\approx$  3,2 ppm at photodetector noise level  $\sigma_n \leq 0,5\%$ , relative measurement error  $\leq 2.5\%$ . The obtained results confirm the effectiveness of the dual-channel approach for enhancing the sensitivity, selectivity, and operational stability of liquid crystal-based optical gas sensors.

**Keywords:** liquid crystal; liquid-crystal sensing element; two-channel optical system; differential method; gas; test medium.

**DOI:** 10.31649/1681-7893-2026-51-1-339-346

### ВСТУП

Контроль концентрації газів у навколишньому середовищі, промислових процесах та системах екологічного моніторингу є важливою науково-технічною задачею. Для вирішення цієї задачі активно розробляються нові типи сенсорів, зокрема сенсори на основі рідких кристалів, які характеризуються високою чутливістю до змін хімічного складу середовища, можливістю візуальної індикації та відносною простотою реалізації.

Одним із перспективних напрямів є використання оптичних методів реєстрації сигналів рідкокристалічних сенсорів, що базуються на аналізі змін оптичних властивостей рідкокристалічного шару під впливом досліджуваного газу. Проте точність таких вимірювань може знижуватися через нестабільність джерела освітлення, вплив зовнішніх факторів та шумів реєстраційної апаратури. Похибка від цих факторів може сягати 10–25 %, що неприйнятно для більшості практичних застосувань.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення двоканальної оптичної системи реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора газів із використанням спектрального розділення каналів у видимому діапазоні. На відміну від традиційних одноканальних схем, запропонований підхід передбачає використання вимірювального та опорного каналів, що дозволяє реалізувати диференціальний метод обробки сигналів. Це забезпечує зменшення впливу нестабільності джерела освітлення, змін умов освітлення та шумів фотоприймальної системи, що підвищує точність і стабільність реєстрації оптичного сигналу рідкокристалічного сенсора. Тому побудова двоканальної оптичної системи реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора газів є актуальною науково-технічною задачею.

*Метою роботи* є розроблення та дослідження двоканальної оптичної системи реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора газів із спектральним розділенням вимірювального та опорного каналів, побудова її математичної моделі та визначення основних метрологічних характеристик. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі *завдання*: обґрунтування вибору спектральних діапазонів вимірювального (500–600 нм) та опорного (~800 нм) каналів; розроблення математичної моделі двоканальної системи з урахуванням нестабільності джерела випромінювання та шумів фотоприймачів; числове моделювання калібрувальної характеристики та аналіз чутливості параметрів сенсора; оцінка виграшу у відношенні сигнал/шум диференціального методу порівняно з одноканальною схемою.

### ОБґРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ДВОКАНАЛЬНОЇ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Авторами розробляються і досліджуються рідкокристалічні композити як первинні чутливі перетворювачі оптичних сенсорів газів [1]. Так, збільшення концентрації холестеричної домішки у композиті призводить до зменшення кроку надмолекулярної спіральної структури і зсуву максимуму поглинання у короткохвильову область спектру. Максимум спектрального поглинання таких композитів відповідає діапазону 500–600 нм [2]. Вплив газів викликає зміни у спектральних характеристиках рідкокристалічних (РК) композитів, що стало основою побудови оптичних рідкокристалічних сенсорних систем газів [3], [4]. У попередніх дослідженнях авторів для реєстрації оптичного сигналу рідкокристалічного первинного перетворювача газів використовувалося освітлення на основі RGB-світлодіода [5]. Такий підхід дозволяє формувати випромінювання у різних ділянках видимого спектра та аналізувати зміну оптичних характеристик РК шару, що виникає під дією досліджуваного газу [6].

Проте використання одноканальної оптичної схеми має ряд недоліків. Зокрема, результати вимірювання можуть залежати від нестабільності інтенсивності джерела світла, зміни умов освітлення, температурних впливів, а також шумів реєстраційної апаратури [7], [8]. Це може призводити до додаткових похибок при визначенні інформативних параметрів сигналу сенсора.

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

У двоканальній оптичній системі канали розділяються за спектральними характеристиками або поляризаційною чутливістю РК чутливого елемента. Перший канал — «вимірювальний» — працює в діапазоні 500–600 нм, де чутливість сенсора до газу є найвищою завдяки зсуву смуги селективного відбивання. Другий канал — «опорний» — працює на довжині хвилі 800 нм і не реагує на газ, однак фіксує будь-які зміни інтенсивності джерела світла. Тому відношення сигналів  $I_1/I_2$  дає змогу виділити корисний сигнал від аналізу. Нормалізація сигналів обох каналів за допомогою диференціального методу реєстрації дозволяє усунути вплив зовнішніх завад [9 - 12].

### ПРИНЦИП ПОБУДОВИ ДВОКАНАЛЬНОГО РК СЕНСОРА ГАЗІВ

На рис. 1 наведено структурну схему двоканальної оптичної системи реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора газів.

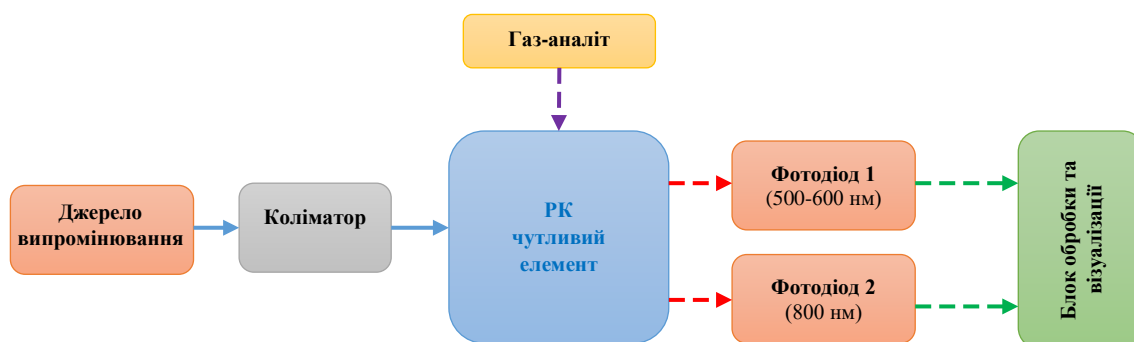


Рисунок 1 – Структурна схема двоканальної оптичної системи реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора унокгазів

Запропонована структурна схема оптичної системи забезпечує диференційний оптичний метод вимірювання концентрації. Ширококутне джерело випромінювання з оптичним діапазоном 400–800 нм генерує оптичний сигнал, що охоплює як вимірювальну (500–600 нм), так і опорну (~800 нм) спектральну смугу. Від джерела випромінювання оптичний сигнал проходить через коліматор, який формує паралельний пучок із рівномірним розподілом інтенсивності по поперечному перерізу. Колімація забезпечує стійкість кута падіння на поверхню чутливого елемента, що є необхідною умовою відтворюваності спектрального відгуку.

Взаємодія газового середовища з рідкокристалічним чутливим елементом призводить до зміни кроку спіралі у спіральній структурі рідкокристалічного композиту. Це приводить до зсуву смуги селективного відбиття в спектральній області 500–600 нм, причому величина зсуву корелює з концентрацією газу. Довжина хвилі ~800 нм знаходиться поза смугою брегівського відбивання і не зазнає впливу аналізу, що дає змогу використовувати її як стабільний опорний канал. Дільник пучка виконує функцію розділення спектрального складу світлового потоку: вимірювальна складова (500–600 нм) скеровується на фотодіод 1, опорна складова (~800 нм) — на фотодіод 2. Фотодіоди перетворюють оптичні сигнали на електричні, формуючи відповідно вимірювальний струм  $I_1$  та опорний струм  $I_2$ .

Нормований сигнал  $S$  є практично інваріантним до мультиплікативних флуктуацій інтенсивності джерела випромінювання, температурного дрейфу фотоприймачів та деградації оптичних елементів, оскільки ці фактори однаково впливають на обидва канали. Таким чином, диференційна схема вимірювання забезпечує підвищену метрологічну стабільність без застосування зовнішніх стабілізаторів. Значення  $S$  перераховується у концентрації газу-аналіту відповідно до попередньої отриманої калібрувальної характеристики сенсора.

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО МЕТОДУ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ У ДВОКАНАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

В роботі проведено математичне моделювання запропонованої двоканальної оптичної системи реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора газів. Основні параметри моделі, що враховують спектральні та енергетичні характеристики системи, наведені в табл. 1.

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Таблиця 1 – Характеристики двоканальної оптичної системи реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора газів

Параметр	Значення
Вимірювальний канал, $\lambda_1$	570 нм
Опорний канал, $\lambda_2$	800 нм
Центр смуги відбивання ( $C=0$ ), $\lambda_0$	550 нм
Коефіцієнт зміщення, $\alpha$	0.3 нм/ppm
Ширина смуги, $\sigma$	30 нм
Максимальне відбивання, $R_{max}$	0.85
Коефіцієнт вимірювального каналу, $k_1\eta_1$	0.765
Коефіцієнт опорного каналу, $k_2\eta_2$	0.760
Пропускання на 800 нм, $T(\lambda_2)$	0.92
Константа [ $K = k_1\eta_1 / [k_2T\eta_2]$ ]	1.096

Для математичної моделі системи використовуються базові математичні рівняння для сигналів на виходах фотодіодів:

$$I_1(t) = I_0(t) \cdot k_1 \cdot R(C, \lambda_1) \cdot \eta_1, \quad (1)$$

$$I_2(t) = I_0(t) \cdot k_2 \cdot T(\lambda_2) \cdot \eta_2, \quad (2)$$

$$S(t) = I_1/I_2 = [k_1 \cdot R(C, \lambda_1) \cdot \eta_1] / [k_2 T(\lambda_2) \cdot \eta_2] = K \cdot R(C, \lambda_1). \quad (3)$$

де  $I_0(t)$  — нестабільність джерела;  $k_1, k_2$  — коефіцієнти каналів;  $R(C, \lambda_1)$  — відбивання РК (залежить від концентрації  $C$ );  $T(\lambda_2) = const$  (на довжині 800 нм);  $\eta_1, \eta_2$  — квантова ефективність фотодіодів.

Константа  $K = k_1\eta_1 / (k_2 \cdot T(\lambda_2) \cdot \eta_2)$  є апаратною калібрувальною константою системи, яка визначається співвідношенням оптичних та електричних характеристик вимірювального і опорного каналів і не залежить від концентрації газу-аналіту, що дозволяє однозначно пов'язати нормований сигнал  $S$  виключно зі спектральним відбиванням рідкокристалічного чутливого елемента  $R(C, \lambda_1)$ . Константа  $K$  враховує відмінності чутливості каналів та оптичних втрат.

Нестабільна складова  $I_0(t)$  мультиплікативно скорочується в нормованому сигналі  $S(t)$ , який залежить лише від відбивання РК елемента  $R(C, \lambda_1)$  – функції концентрації газу.

Оскільки реальне джерело світла має складний частотний спектр нестабільності, то в моделі використовується сума синусоїд різних частот:

$$I_0(t) = I_0 \cdot [1 + A \cdot \sin(2\pi f_1 t + \varphi) + 0,4A \cdot \sin(2\pi f_2 t)], \quad (4)$$

де  $A$  – амплітуда дрейфу (0-35%);  $f_1=0,7$  Гц;  $f_2=2,1$  Гц. Шум фотодіодів додається як некорельований гауссівський процес з  $\sigma_n = 2\%$  від сигналу.

### ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОГО СЕНСОРА

У результаті моделювання отримано калібрувальну залежність  $S(C)$ , яка має гауссівський характер (рис. 2). Практичний інтерес представляє гілка кривої від  $C = 0$  до  $C \approx 80$  ppm, де залежність близька до лінійної.

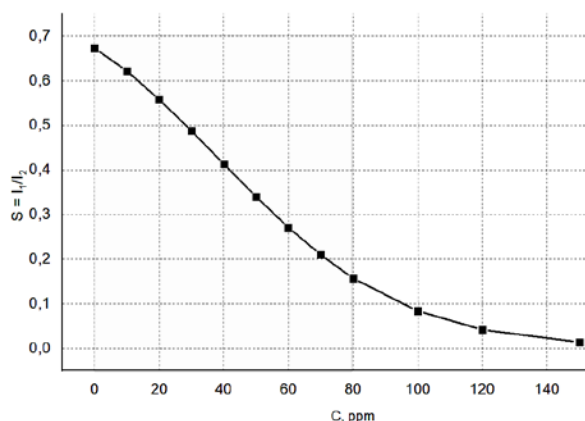


Рисунок 2 – Калібрувальна крива  $S(C)$

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Калібрувальна залежність побудована за моделлю гауссівського відбивання на  $\lambda_1 = 570$  нм при зміщенні  $\lambda_m = 550 - 0.3 \cdot C$  нм,  $\sigma = 30$  нм,  $R_{max} = 0.85$ ,  $K = 1.096$ ,  $T(\lambda_2) = 0.92$ .

$$S(C) = K \cdot R_{max} \exp\left(\frac{-(\lambda_1 - \lambda_m(C))^2}{(2\sigma^2)}\right). \quad (5)$$

На рис. 3 показано, як змінюється SNR двох методів при зростанні амплітуди дрейфу джерела. При малому дрейфі ( $A < 3\%$ ) обидва методи рівнозначні — переважає шум фотодіодів. При  $A > 5\%$  диференціальний метод різко виграє.

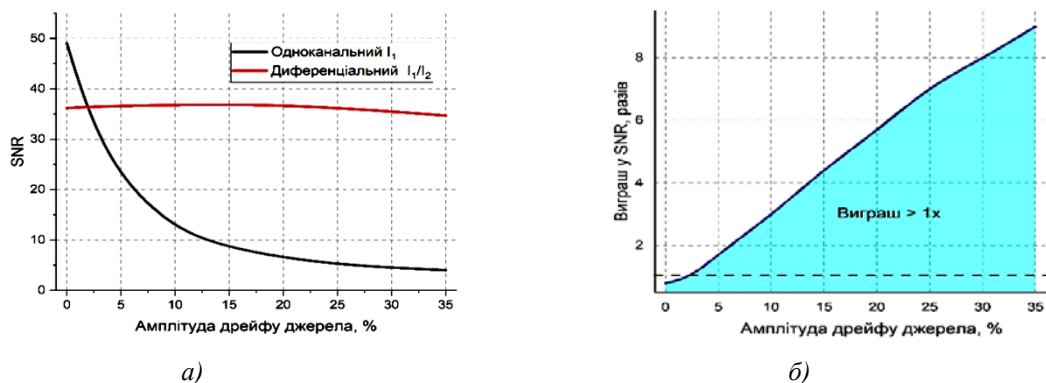


Рисунок 3 – SNR двох методів - амплітуда дрейфу джерела (а), виграш у SNR диференціального методу (б)

При типовому дрейфі LED-джерела у діапазоні 10–20% диференціальний метод забезпечує виграш у SNR від 7 до 13 разів порівняно з одноканальною реєстрацією. Кількісне порівняння ефективності одноканального та диференціального методів наведено в табл. 2. Як видно з наведених даних, диференціальний підхід забезпечує істотне зменшення стандартного відхилення сигналу та підвищення відношення сигнал/шум. Починаючи з  $A > 3\%$ , нестабільність джерела стає домінуючим джерелом похибки і диференціальний метод є більш доцільний для досягнення точності  $< 5\%$  FS.

Таблиця 2 – Порівняння одноканального та диференціального методів при  $C = 60$  ppm,  $A = 15\%$ ,  $\sigma_n = 2\%$

Параметр	Одноканальний	Диференціальний
Середнє значення	0.4854	0.418
СКВ (шум+дрейф)	0.0718	0.0201
Відносний розкид, %	14.80%	4.81%
SNR	6.76	20.8
Залишкова похибка дрейфу	$\approx 15\%$	$< 0.5\%$

SNR визначалося як відношення середнього значення сигналу до стандартного відхилення ( $SNR = \mu/\sigma$ ). Отримані значення демонструють приблизно триразове покращення співвідношення сигнал/шум у диференціальному методі. Вищі оцінки виграшу (7–13 разів), наведені раніше, відповідають випадку домінування дрейфу джерела та оцінюються за енергетичними характеристиками шуму.

### ОЦІНЮВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТА МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ

Також досліджено метрологічні характеристики двоканальної оптичної системи в умовах реального рівня шуму фотоприймачів. Межа виявлення LOD є ключовим показником, що визначає мінімальну концентрацію газу-аналіту, яку система здатна достовірно зареєструвати. Відповідно до стандартної методики аналітичної хімії, LOD розраховується як потроєне стандартне відхилення нормованого сигналу, поділене на крутизну калібрувальної кривої  $dS/dC$  у початковій точці діапазону вимірювання

$$LOD = 3 \cdot \sigma(S) / |dS/dC| \quad (6)$$

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНИТОРИНГУ

Слід зауважити, що крутизна  $dS/dC$  має максимальне значення в околі  $C = 0$  і зменшується зі зростанням концентрації внаслідок гауссівського характеру калібрувальної залежності  $S(C)$ . Тому оцінка LOD базується на локальній чутливості в початковій точці, тоді як на більш високих концентраціях ефективна чутливість є нижчою.

Крутизна калібрувальної кривої у початковій точці визначається диференціюванням виразу (5) за концентрацією  $C$  при  $C = 0$ , що дає максимальне значення чутливості системи у лінійній ділянці характеристики  $S(C)$ .

Залежність LOD від рівня шуму фотодіодів  $\sigma_n$  є лінійною (рис. 4, а): зростання шуму з 0,5 % до 1,0 % є причиною зниження межі від 3,2 ppm до 6,4 ppm відповідно. Для забезпечення  $\text{LOD} \approx 3$  ppm необхідний рівень шуму фотодіодів  $\sigma_n \leq 0,5$  %, що обґрунтовує вибір мал шумних фотоприймачів як ключового апаратного рішення.

Для статистичної верифікації аналітичних результатів та оцінки реального розкиду нормованого сигналу  $S$  в умовах одночасної дії шуму фотодіодів та нестабільності джерела випромінювання проведено чисельне моделювання методом Монте-Карло з кількістю реалізацій  $n = 2000$ . Розподіл  $S$  для концентрацій  $C = 30$  ppm та  $C = 80$  ppm зображений на рис.4, б.

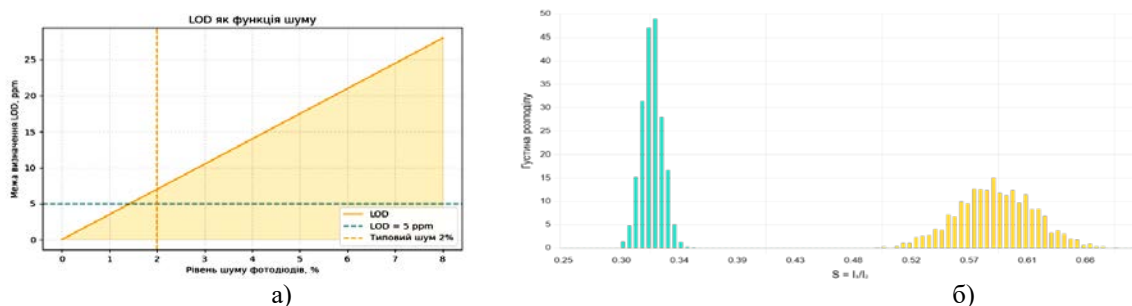


Рисунок 4 – Вплив шуму та межа визначення концентрації: а) LOD як функція шуму фотодіодів; б) розподіл  $S$  за методом Монте-Карло для двох концентрацій (30 та 80 ppm)

Моделювання виконано для двох значень концентрації газу-аналіту:  $C = 30$  ppm та  $C = 80$  ppm, що відповідають середній та верхній межі робочого діапазону системи. Для  $C = 30$  ppm середнє значення нормованого сигналу  $\bar{S} = 0,584$  зі стандартним відхиленням  $\sigma(S) = 0,0083$ , що відповідає правильному розкиду 1,41 %; для  $C = 80$  ppm  $\bar{S} = 0,318$  при  $\sigma(S) = 0,0045$  з аналогічним відносним розкидом 1,41 %. Рівномірність відносного розкиду по всьому робочому діапазону свідчить про стабільну метрологічну поведінку системи та відсутність концентраційно-залежних систематичних похибок.

Оцінка LOD за критерієм  $3\sigma$  для різних рівнів шуму фотодіодів показала, що при  $\sigma_n = 0,5$  % і  $\sigma(S) = 0,0053$  досягається  $\text{LOD} \approx 3,2$  ppm при відносному розкиді 0,71 %, тоді як при  $\sigma_n = 1,0$  % і  $\sigma(S) = 0,0105$  межа виявлення стає  $\text{LOD} \approx 6,4$  ppm при розкиді 1,41 %. При  $\sigma_n = 2$  % LOD зростає до 12,7 ppm. Таким чином, вибір мал шумних фотодіодів є визначальним фактором для забезпечення високої чутливості системи в цілому.

Для аналізу чутливості та динамічного діапазону первинного рідкокристалічного сенсора проведено моделювання впливу його параметрів, зокрема чутливості до спектрального зсуву, ширини смуги відбивання та положення вимірювального каналу, на форму та нахил калібрувальної залежності  $S(C)$ . Результати аналізу представлені на рис. 5.

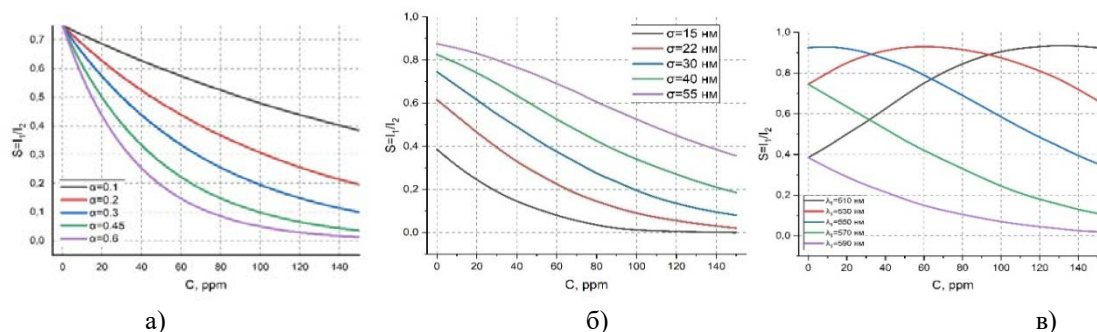


Рисунок 5 – Результати аналізу чутливості рідкокристалічного сенсора: вплив коефіцієнта  $\alpha$  (а), ширини смуги  $\sigma$  (б), положення каналу  $\lambda_l$  (в) на  $S(C)$

# ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Результати кількісного аналізу чутливості параметрів системи узагальнено в табл. 3.

Таблиця 3 - Кількісний аналіз чутливості

Параметр	Зміна	Вплив на чутливість $dS/dC$	Висновок
$\alpha$ (нм/ppm)	0.1 – 0.6	+500%	Лінійне зростання чутливості
$\sigma$ (нм)	15 - 55	Спад при $\sigma > 30$ нм	Оптимальне $\sigma = 20 - 30$ нм
$\lambda_l$ (нм)	510 - 590	Залежить від $\lambda_m(0)$	$\lambda_1 = \lambda_0 + \alpha C_{mid}$
$R_{max}$	0.5 – 0.95	Пропорційний вплив	Вищий $R_{max}$ - краще SNR

Отримані результати підтверджують, що запропонована двоканальна оптична система забезпечує відтворення та статистично обґрунтовані вимірювання концентрації газу в усьому робочому діапазоні 0–80 ppm, а визначені метрологічні характеристики є реалістичними та досяжними за умов застосування стандартних малошумних фотоприймачів.

## ВИСНОВКИ

У роботі розроблено та досліджено двоканальну оптичну систему реєстрації сигналів рідкокристалічного сенсора газів із спектральним розділенням каналів. Вимірювальний канал (500–600 нм) реєструє зсув смуги селективного брегівського відбивання холестеричного рідкокристалічного композиту, спричинений взаємодією з газом-аналітом, тоді як опорний канал (~800 нм) функціонує поза зоною відбивання і забезпечує компенсацію нестабільності джерела освітлення.

Розроблено математичну модель системи на основі рівнянь для вихідних сигналів фотодіодів, яка аналітично підтверджує, що нормований сигнал  $S = I_1/I_2$  є інваріантним до мультиплікативної нестабільності джерела  $I_0(t)$ . Числове моделювання показало, що залишкова похибка від дрейфу джерела знижується з 15 % до менше 0,5 % при типовому рівні шуму 2%.

Проведений аналіз співвідношення сигнал/шум підтвердив, що при типовому дрейфі LED-джерела в діапазоні 10–20 % диференціальний метод забезпечує вигравш у SNR від 7 до 13 разів порівняно з одноканальною реєстрацією. Починаючи з  $A > 3$  %, нестабільність джерела стає домінуючим джерелом похибки, що робить застосування двоканальної схеми обов'язковим для забезпечення точності вимірювань  $< 5$  % FS.

Калібрувальна залежність  $S(C)$  має квазігауссівський характер, що зумовлено гауссівською формою спектральної смуги відбивання рідкокристалічного чутливого елемента та її зсувом зі зміною концентрації. Для розширення діапазону доцільно застосовувати поліноміальну апроксимацію 2-3-го порядку.

Монте-Карло аналіз ( $n=2000$ ) показує, що при  $\sigma_n = 1\%$  відносний розкид  $S$  становить 1,41%, що відповідає точності визначення концентрації 6–7 ppm. За рівня шуму  $\sigma_n \leq 0,5\%$  точність підвищується до  $LOD \approx 3,2$  ppm.

Аналіз чутливості параметрів рідкокристалічного первинного перетворювача показав, що оптимальні умови роботи системи досягаються при коефіцієнті спектрального зсуву  $\alpha \geq 0,3$  нм/ppm, ширині смуги відбивання  $\sigma = 20$ –30 нм та положенні вимірювального каналу  $\lambda_l \approx \lambda_0 + \alpha \cdot C_{mid}$ .

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого двоканального підходу для підвищення точності, стабільності та відтвореності вимірювань концентрації газів. Система є перспективною для застосування в задачах екологічного моніторингу, промислового контролю безпеки та неінвазивної медичної діагностики на основі аналізу газових сумішей.

## ПОДЯКА

Робота виконана в межах науково-дослідного проєкту «Функціональні первинні перетворювачі сенсорних пристроїв на основі рідкокристалічних матеріалів для використання в екстремальних умовах» (№ держреєстрації 0126U001141) за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. I. Kremer, et al., "Primary converter of optical sensors for explosive hazardous substances," in *Proc. SPIE — The International Society for Optical Engineering*, vol. 14009, art. no. 1400918, 2025. <https://doi.org/10.1117/12.3099037>.

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

---

---

2. V. P. Shibaev et al., "Rebirth of Liquid Crystals for Sensoric Applications: Environmental and Gas Sensors," *Advances in Condensed Matter Physics*, vol. 2015, Art. 729186, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/729186>
3. M. Löttsch et al., "Optical Monitoring of Gases with Cholesteric Liquid Crystals," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 132, no. 16, pp. 5777–5779, 2010. <https://doi.org/10.1021/ja907826z>.
4. Y. Yang et al., "Optical fiber sensor based on a cholesteric liquid crystal film for mixed VOC sensing," *Optics Express*, vol. 28, no. 21, pp. 31872–31881, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1364/OE.405627>.
5. Z. Mykytyuk, et al., "Features of the transition to the isotropic state of the liquid crystal sensitive element of the gas sensor under the action of acetone vapor," *Physics and Chemistry of Solid State*, vol. 23, no. 3, pp. 473–477, 2022. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.473-477>.
6. J. Hu et al., "Simple and stable gas–liquid two-phase optical fiber sensor for acetone based on cholesteric liquid crystal," *Optics Communications*, vol. 158, Art. 107151, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128890>.
7. A. Ymeti et al., "Drift correction in a multichannel integrated optical Young interferometer," *Applied Optics*, vol. 44, no. 3, pp. 3409–3412, 2005. <https://doi.org/10.1364/ao.44.003409>.
8. G. Quaranta et al., "Signal drift of oxygen optical sensors. Part II: Smart drift correction algorithm and its experimental check with a light intensity detection based sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 179, pp. 166–173, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.12.045>.
9. K. Achtenberg et al., "Two-Channel Detecting Sensor with Signal Cross-Correlation for FTIR Instruments," *Sensors*, vol. 22, no. 22, Art. 8919, Nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22228919>.
10. M. Yue et al., "A Dual-Signal Ratiometric Optical Sensor Based on Natural Pine Wood and Platinum(II) Octaethylporphyrin with High Performance for Oxygen Detection," *PMC / MDPI Sensors*, vol. 25, no. 12, Art. 3945, 2024. <https://doi.org/10.3390/s25133967>.
11. K. Achtenberg et al., "Comparative Analysis of the Selected Photoreceiver Input Stages in Terms of Noise," *PMC / MDPI Sensors*, vol. 14, no. 5, Art. 902, 2025. <https://doi.org/10.3390/s25051359>.
12. Kukharchuk, V.V., Pavlov, S.V., Holodiuk, V.S., et al. Information conversion in measuring channels with optoelectronic sensors, *Sensors*, 2022, 22(1), 271

Рекомендована кафедрою електронної інженерії НУ «ЛПІ»

Дата надходження: 15.02.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 25.03.2026

Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до  
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**КРЕМЕР ІРИНА ПЕТРІВНА** – канд. техн. наук, доцент, заступник директора з науково-педагогічної роботи Інституту інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії, e-mail: iryna.p.kremer@lpnu.ua; 0000-0003-2362-1195, <https://orcid.org/0000-0003-2362-1195>

**ШИМЧИШИН ОЛЬГА ЙОСИФІВНА** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електронної інженерії, e-mail: olha.y.shymchyshyn@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8697-4513>

**ІВАХ МАРІЯ СТЕПАНІВНА** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електронної інженерії, Національний університет «Львівська політехніка», Львів  
e-mail: mariia.s.ivakh@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-6735-5426>

**Iryna KREMER, Olha SHYMCHYSHYN, Mariia IVAKH**

**DUAL-CHANNEL OPTICAL SIGNAL REGISTRATION SYSTEM FOR A LIQUID CRYSTAL GAS SENSOR**

Lviv Polytechnic National University