

УДК 621.382.8:535.416]:628.5

**АДАПТИВНА МІКРОЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА ПРИЙОМУ
ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ДЛЯ
ОПТИЧНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ПВВ-СЕНСОРА**

Стаднік Д.В.

e-mail: daniil.stadnik@nure.ua

Науковий керівник –к.ф.м.н., доц. Галат О.Б.,
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП
м. Харків, Україна

This work presents an adaptive microelectronic system for signal acquisition and processing in an optical environmental sensor based on the total internal reflection effect. A planar waveguide is used to simplify sensor design and integration. The system includes a stabilized laser source, low-noise transimpedance amplifier, and high-resolution ADC. By controlling the angle of light incidence, the penetration depth of the evanescent field and sensor sensitivity can be adjusted in real time. The output signal is digitally processed using the Beer–Lambert law to determine pollutant concentration. The proposed architecture ensures reliable, accurate, and energy-efficient environmental monitoring.

Зростання антропогенного навантаження на довкілля суттєво підвищує актуальність безперервного екологічного моніторингу у режимі реального часу. Методи, що передбачають відбір проб і лабораторний аналіз, не забезпечують оперативного реагування на аварійні викиди забруднювачів. Це зумовлює потребу в автономних інформаційно-вимірювальних системах, здатних здійснювати локальні вимірювання, первинну обробку та передачу даних безпосередньо з місця спостереження.

Перспективними є сенсори на основі ефекту повного внутрішнього відбиття (ПВВ), які використовують еванесцентне поле з глибиною проникнення десятки–сотні нанометрів. Висока поверхнева селективність дозволяє ефективно застосовувати їх у каламутних та агресивних середовищах, де традиційні фотометричні методи малоефективні. Крім того, оптичні сенсори є стійкими до електромагнітних завад [1].

Метою роботи є розробка інтегрованої мікроелектронної платформи для керування, обробки й передачі даних, що забезпечує оперативний і достовірний контроль параметрів довкілля.

Оснoву розробленoгo експериментальнoгo апаратнoгo комплексу становить підсистема формування оптичнoгo випромінювання та його введення в чутливий елемент. Замість технологічно складних D-подібних волокон запропоновано використати макроскопічний планарний хвильовод у вигляді стандартної скляної пластини. Таке рішення суттєво спрощує конструкцію сенсорного модуля, полегшує його інтеграцію з друкованими платами та знижує вимоги до прецизійного волоконного монтажу[1].

Джерелом випромінювання є компактний напівпровідниковий лазерний модуль видимого діапазону. Його робота забезпечується прецизійним драйвером стабілізації струму. Підтримання режиму постійного струму дозволяє стабілізувати вхідну оптичну потужність P_{in} та гарантувати відтворюваність вимірювань без застосування складних схем активної термокомпенсації.

В експериментальній установці зміна зовнішнього кута введення світла θ_{in} у планарний хвилевід здійснюється за допомогою прецизійного оптомеханічного поворотного столика з мікрометричним гвинтовим приводом. Такий механізм забезпечує тонке кутове налаштування з високою роздільною здатністю. У перспективній автоматизованій версії системи цей вузол може бути оснащений кроковим мікродвигуном, що дозволить мікроконтролеру здійснювати динамічне керування позиціонуванням. Відповідно до закону Снелліуса, внутрішній кут падіння на робочу грань $\theta_{internal}$ однозначно визначається зовнішнім кутом введення:

$$n_{air} \sin(\theta_{in}) = n_{glass} \cos(\theta_{internal}).$$

Таким чином, зміна одного геометричного параметра забезпечує контроль умов поширення випромінювання в хвилеводі.

Керування кутом θ_{in} дозволяє змінювати глибину проникнення еванесцентного поля δ у досліджуване середовище. Для довжини хвилі 650 нм зміна кута введення в діапазоні 0–40° призводить до збільшення глибини проникнення приблизно від 150 до 450 нм [2]. Це перетворює статичний хвилевід на адаптивний вимірювальний елемент із регульованою чутливістю.

Після взаємодії еванесцентного поля з аналітом оптична потужність на виході P_{out} зменшується відповідно до концентрації забруднювача. Реєстрацію цього сигналу забезпечує оптоелектронна підсистема прийому.

Як фотоприймач використовуються високочутливі кремнієві PIN-фотодіоди, оптимізовані для видимого діапазону. До системи обробки сигналу входить низькошумовий трансімпедансний підсилювач (ТІА), аналоговий фільтр та 16- або 24-розрядний аналого-цифровий перетворювач, інтегрований з мікроконтролером.

Передавальна характеристика оптоелектронного тракту описує залежність вихідної напруги V_{out} від кута введення θ_{in} . Зі збільшенням θ_{in} оптоелектронного у межах 0–40° спостерігається нелінійне зменшення напруги (рис.1). Це пов'язано з тим, що при наближенні внутрішнього кута до критичного значення повного внутрішнього відбиття глибина проникнення еванесцентного поля зростає, що посилює відбір оптичної енергії досліджуваним середовищем. Після перевищення критичного кута умови ПВВ порушуються, світло частково заломлюється в рідину і не досягає фотодетектора, що призводить до втрати робочого режиму сенсора.

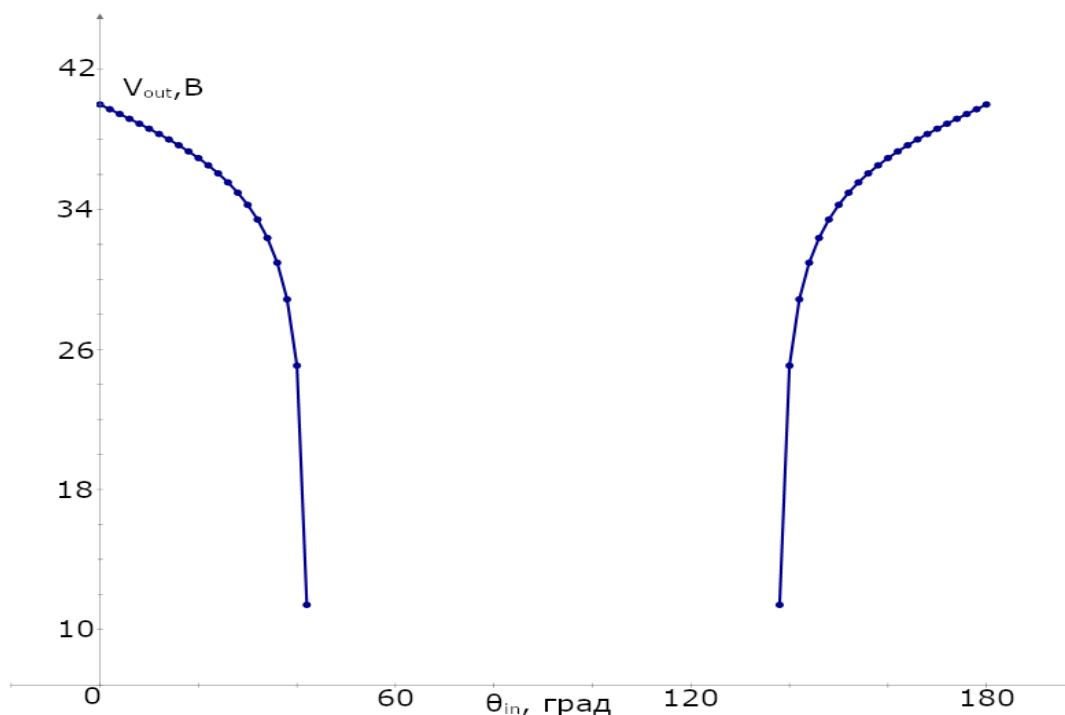


Рис 1. – Передавальна характеристика оптоелектронного тракту: залежність вихідної напруги ТІА від кута введення випромінювання

Оцифровані та попередньо оброблені дані передаються до центральних вузлів екологічного моніторингу. Для автономної роботи система може оснащуватися бездротовими трансиверами для інтеграції в мережі WSN.

Поєднання планарних хвильоводів із сучасною мікроелектронною системою керування є перспективним напрямом розвитку автономних екологічних сенсорів. Запропонована архітектура дозволяє адаптивно змінювати чутливість сенсора шляхом керування кутом введення випромінювання в режимі реального часу.

Інтеграція прецизійних аналогових каскадів із цифровими модулями передачі даних забезпечує високу точність вимірювання та надійну доставку інформації до інформаційних систем моніторингу.

Список використаних джерел:

1. Dajuan Lyu, Qing Huang, Xiaokun Wu, Yanbo Nie, Minghong Yang, "Optical fiber sensors for water and air quality monitoring: a review," Opt. Eng. 63(3) 031004 (8 November 2023) <https://doi.org/10.1117/1.OE.63.3.031004>.
2. Галат О. Б. Адаптивний оптичний сенсор на планарному хвильоводі для системи екологічного моніторингу / О. Б. Галат, Е. І. Лашко, Д. В. Стаднік // Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології (AERT-2025) : матеріали VII форуму, 11-12 грудня 2025 р. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – С. 66-69.