

УДК 681.7.068:502.1

МОНІТОРИНГ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ

Стаднік Д.В.

e-mail: daniil.stadnik@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП
м. Харків, Україна

This work presents optical methods as reliable tools for environmental monitoring. Rapid, non-destructive analysis of pollutants in air and water is achieved via light interaction. The study examines spectral changes from absorption, scattering, and fluorescence. Advanced fiber-optic sensors accurately detect trace contaminants. Optical biosensors and remote sensing platforms offer remarkably high specificity. The approach effectively links optical properties with material traits. Adaptive algorithms and nanocoatings counter sensor drift and interference. Together, these systems enable fully automated, real-time environmental assessment.

Оптичні методи є ефективним інструментом для моніторингу навколишнього середовища завдяки можливості швидкої, неdestructивної оцінки забруднювачів у повітрі та воді [1]. Досягнення у галузі волоконної оптики, оптичних біосенсорів та дистанційного зондування дозволили створити ефективні системи моніторингу та раннього попередження, що виявляють навіть невеликі концентрації забруднювачів.

Метою роботи є дослідження технологій, що базуються на взаємодії світла з речовиною (поглинання, розсіювання, флуоресценція), для оперативного отримання кількісної інформації про забруднювачі та усунення недоліків традиційних лабораторних методів, що затримують прийняття критичних рішень.

Методика оптичного моніторингу ґрунтується на тому, що взаємодія світла із середовищем змінює його спектральні характеристики, які відображають фізико-хімічні властивості досліджуваного об'єкта [2,3]. Оптичні властивості матеріалу, зокрема коефіцієнти поглинання та розсіювання, визначаються як його внутрішньою будовою – молекулярною структурою, атомними взаємодіями та хімічним складом, так і зовнішніми умовами, зокрема освітленням. Ці властивості формують комплексну характеристику, де внутрішні особливості і умови вимірювання взаємодіють, створюючи кінцевий спектр оптичних показників [1]. Наприклад, волоконно-оптичні датчики, що передають світло через волокно, реагують на навколишнє середовище, змінюючи інтенсивність і спектральний розподіл сигналу, що дозволяє визначити навіть незначні концентрації забруднювачів [2]. Оптичні біосенсори, інтегруючи селективні біорозпізнавальні елементи з оптичними детекторами, забезпечують високоспецифічне визначення цільових аналітів, а платформи

дистанційного зондування зі супутників чи літаків збирають мультиспектральні дані для оцінки масштабних екологічних параметрів. Цей підхід дозволяє оперативно реагувати на зміни забруднення та сприяє ефективному управлінню екологічними ризиками, що значно покращує якість довкілля.

У сфері моніторингу якості води застосовуються різноманітні волоконно-оптичні сенсори, що дозволяють як точно визначати турбідність, так і проводити хімічний аналіз водних зразків у режимі реального часу. Наприклад, система для вимірювання турбідності працює за принципом аналізу відбитого світла: високоефективні світлодіоди з піковими довжинами хвиль 470 нм та 635 нм генерують світлові імпульси, які передаються через волоконно-оптичні провідники (ядро ≈ 1 мм) до зразка води. Суспензії частинок у воді розсіюють падаюче світло під кутом 180° , після чого спеціалізовані фотодіоди перетворюють отриманий сигнал у пропорційну напругу. Посилення та подальший аналіз сигналу здійснюється мікроконтролером, що дозволяє встановити лінійну залежність між концентрацією частинок і часом заряджання RC (RCTIME) – наприклад, для синьої системи RCTIME знижується на 21.775 одиниць при збільшенні концентрації на 1 мг/л ($R^2 = 0.9584$), що забезпечує точне визначення турбідності навіть при концентраціях нижче 10 мг/л [4].

Одночасно, волоконно-оптичні хімічні сенсори та біосенсори використовуються для виявлення важких металів, органічних забруднювачів та патогенів, відстежуючи зміни оптичних характеристик світла, що проходить через водні зразки або відбивається від них [1]. Такий підхід усуває потребу в складній підготовці зразків і скорочує час аналізу та витрати.

Подібні принципи застосовуються також у моніторингу якості повітря, де оптичні прилади – еталометри та лічильники часток – забезпечують безперервне вимірювання концентрації завислих частинок, включаючи чорний вуглець та дрібнодисперсні частки. Вимірювання оптичного ослаблення, спричиненого частинками, надає критично важливі дані для оцінки впливу викидів від згоряння на здоров'я населення та клімат.

Крім того, застосування методів дистанційного зондування, таких як радіометри кольору океану та LIDAR, дозволяє проводити широкомасштабні екологічні оцінки, наприклад, моніторинг цвітіння водоростей чи вирубки лісів [2].

У сфері моніторингу якості води волоконно-оптичні хімічні сенсори та біосенсори використовуються для виявлення важких металів, органічних забруднювачів та патогенів у режимі реального часу [1]. Такі пристрої відстежують зміни оптичних характеристик світла, що проходить через водні зразки або відбивається від них. Це, відповідно, усуває потребу в складній підготовці зразків, та скорочуючи термін аналізу та витрати.

Аналогічним чином для оцінки якості повітря застосовуються оптичні прилади – еталометри та лічильники часток, що забезпечують безперервне вимірювання концентрації частинок, включаючи чорний вуглець та дрібнодисперсні частки. Вимірювання оптичного ослаблення, спричиненого завислими частинками, надає критично важливі дані для аналізу впливу викидів від згоряння на здоров'я населення та клімат. Також методи дистанційного зондування з використанням приладів, на кшталт радіометрів кольору океану та LIDAR, дозволяють проводити екологічні оцінки на широких територіях, виявляючи явища типу цвітіння водоростей чи вирубки лісів [2].

Оптичні методи, попри свої переваги, можуть страждати від зсуву сенсорів та впливу зовнішніх чинників, як-от температурні коливання і стороннє світло. Щоб зменшити ці похибки, застосовують наноструктуровані покриття, які завдяки тонкій структурі та високій стабільності знижують первинні завади, і адаптивні алгоритми, що в режимі реального часу компенсують залишкові відхилення за допомогою оптимізації та машинного навчання. Об'єднання цих підходів створює синергічний ефект, забезпечуючи стабільну роботу сенсорів і високу точність оптичних вимірювань навіть у складних умовах.

Враховуючи вищесказане, можна зробити наступні висновки. Сучасні оптичні методи демонструють значний потенціал у моніторингу навколишнього середовища. Інтеграція різноманітних технологій, зокрема волоконно-оптичних сенсорів, у єдині мережі забезпечує оперативну передачу даних і автоматизований аналіз, що дозволяє виявляти навіть мінімальні концентрації забруднювачів. Подальші розробки в області мініатюризації [3], дизайну та вдосконалення калібрування сприятимуть підвищенню чутливості і надійності сенсорів у складних умовах експлуатації.

Список використаних джерел:

1. Long F., Zhu A., Shi H. Recent advances in optical biosensors for environmental monitoring and early warning. *Sensors*. 2013. Vol. 13, No. 10. P. 13928–13948.
2. Stewart G., Jin W., Culshaw B. Prospects for fibre-optic evanescent-field gas sensors using absorption in the near-infrared. *Sens Actuators B Chem.* 1997. Vol. 38, No. 1. P. 42–47.
3. Galat A.B. Calculation of the absorbing capacity of a solar CuIn1–XGaXSe2 photovoltaic converter. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, No 1. P. 61–67.
4. Omara A. F., Mat Jafri M. Z. Development of Optical Fiber Sensor for Water Quality Measurement. 2008. DOI: 10.1063/1.2940669.