

**В.С. Кретуліс, І.Є. Мінакова, П.Ф. Олексенко**

## **ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ БАЗОВИЙ МОДУЛЬ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ**

Розроблено і створено оптоелектронний базовий модуль сенсорних систем метеорологічного та екологічного моніторингу атмосферного середовища, що складається з двох уніфікованих блоків випромінювача і фотоприймача та в своїй побудові базується на об'єднанні нефелометричного та трансмісометричного методів. Реалізовані на основі базового модуля сенсори забезпечують з високими технічними характеристиками визначення і контроль прозорості атмосфери,  $k$ -фактора, метеорологічної дальності видимості та масової концентрації у повітрі твердих аерозольних частинок сажі.

**Ключові слова:** оптоелектронний сенсор, метеорологічна дальність видимості, нефелометр, трансмісометр, показник розсіяння, моніторинг стану атмосфери.

### **1. ВСТУП**

Стан навколишнього атмосферного середовища є одним з найважливіших факторів успішної життєдіяльності людини, при цьому визначення видимості і зорового сприйняття об'єктів є головним фактором безпеки в роботі усіх видів транспортних засобів. Тому моніторинг атмосфери з таких метеорологічних елементів, як прозорість атмосфери, дальність видимості, показник ослаблення оптичного випромінювання і створення ефективних апаратно-приладних інструментів їх визначення становить масштабну науково-технічну задачу.

Метою даної роботи є розробка оптоелектронного базового модуля сенсорних систем метеорологічного та екологічного моніторингу, який в своїй реалізації базується на об'єднанні нефелометричного і трансмісометричного методів. У плані екологічного моніторингу результат вимірювання може використовуватись як міра оцінки концентрації твердих аерозольних частинок елементарного вуглецю (сажі) в атмосферному повітрі.

### **2. ПОБУДОВА БАЗОВОГО МОДУЛЯ**

У приладній практиці визначення прозорості приземного шару атмосфери широко використовуються два методи: нефелометричний і трансмісометричний [1, 2]. Основою методу трансмісометра є безпосереднє визначення коефіцієнта ослаблення (пропускання) оптичного випромінювання в шарі атмосферного повітря, який іменується вимірювальною базою, що зумовлено процесами розсіяння і поглинання частинками аерозолію потоку світла. Трансмісометричний метод потребує просторового рознесення функціональних блоків випромінювача та фотоприймача і тому реалізується в приладних інструментах визначення обмеженої видимості та виключає їх використання на малих майданчиках, у горах, на морі, на нестійких ґрунтах.

Нефелометричний метод базується переважно на вимірюванні частки початкового зондуючого потоку випромінювання, розсіяного в досліджуваному атмосферному середовищі і зумовленого ефектом спрямованого прямого розсіяння. При цьому в переважній більшості метеоситуацій ступінь прозорості середовища визначається головним чином мікроструктурою та концентрацією частинок води у вигляді крапель або кристалів практично незалежно від довжини хвилі зондуючого випромінювання у видимому та ближньому ІЧ діапазоні [3].

Нефелометричний метод може забезпечити широкий (до чотирьох порядків) діапазон вимірювання метеорологічних величин. Однак реалізація цієї можливості пов'язана з нівелюванням (практичним усуненням) методичних та інструментальних похибок.

Існуюча концепція нефелометричного методу базується на вимірюванні потоку прямого розсіяння, індукованого у вимірювальному об'ємі зондуємим потоком випромінювання. Вимірювальний об'єм атмосферного середовища, як об'єкт дослідження, формується взаємодією колімованих світових пучків випромінювача та фотоприймача під кутом розсіяння  $\theta$  і, таким чином, структурний склад нефелометрів містить блок випромінювача БВ, вимірювальний об'єм ВО та блок фотоприймача БФП.

У приладній реалізації нефелометричного методу загально визнано використовується як аналітична модель нефелометричне рівняння [2, 4]:

$$F_P = F_0 k_{oc} \beta_0, \quad (1)$$

де  $F_P$  – потік розсіяння, що створюється вимірювальним об'ємом і досягає чутливої ділянки фотодетектора у БФП;  $F_0$  – потік, зондує вимірювальний об'єм;  $k_{oc}$  – геометричний фактор конструкції оптичної системи БФП;  $\beta_0$  – показник розсіяння досліджуваного атмосферного середовища, що задовольняє лінійну модель (1).

Зведення рівняння (1) до максимального зареєстрованого фотодетектором потоку розсіяння  $F_{max}$  надає можливість оперувати відносними величинами, що полегшує процес визначення сталої конкретного зразка нефелометра  $C_{ДВ}$ :

$$\chi = \frac{F_D}{F_{max}} = C_{ДВ} \beta_a, \quad (2)$$

де параметр  $\chi$  – коефіцієнт зведення потоку розсіяння до максимального значення.

Оскільки БФП виконує лінійне фотометричне перетворення потоку розсіяння  $F_P$  до вихідної змінної напруги діючого значення  $U$ , починаючи з порогового рівня  $U_{min}/U_{ШЗ} \approx 6$  ( $U_{ШЗ}$  – середньоквадратичне значення вихідної напруги при  $F_P=0$ , що забезпечує вірогідність визначення  $\chi$  більшого за 90%), то

$$\chi = \frac{U - U_{\text{оц}}}{U_{max} - U_{\text{оц}}} = \tilde{N}_{ДВ} \beta_a, \quad (2a)$$

де  $U_{max}$  – вихідна напруга, що відповідає  $F_{max}$  на фотодетекторі.

Рівняння (1) як аналітична модель нефелометричного методу є спрощеною та не враховує ослаблення потоків випромінювання на окремих ділянках траєкторії візування (рис. 1а). Оскільки БВ і БФП зазвичай рівно віддалені від центра вимірювального об'єму, то загальна траєкторія візування дорівнює  $L$ , і повна аналітична модель з урахуванням втрат на розсіяння за траєкторією візування має вигляд:

$$\chi = \frac{1}{L} C_{ДВ} \beta L \exp(-\beta L), \quad (3)$$

де  $\beta$  – скоректований з урахуванням втрат показник розсіяння атмосферного середовища.

При  $\beta L \leq 0,23$  з похибкою не більшою за 3% виконується рівняння

$$\exp(-\beta L) = 1 - \beta L.$$

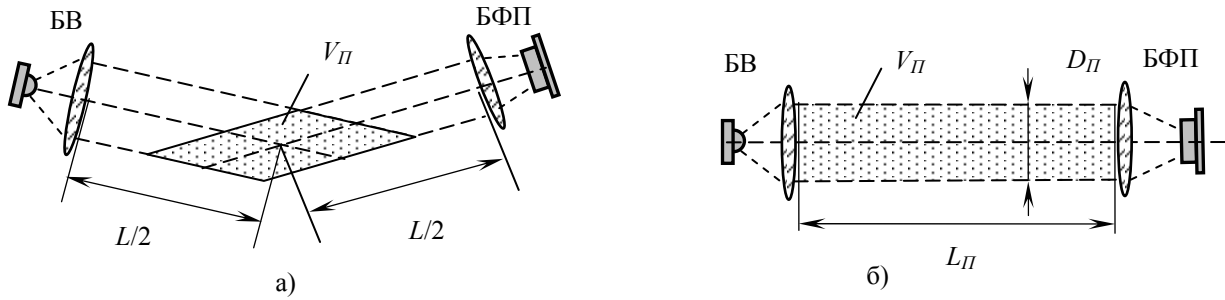


Рис. 1. Оптичні моделі базового модуля у приладній реалізації нефелометричного (а) і трансмісометричного (б) методів.

Тоді визначення  $\beta$  зводиться до рішення квадратного рівняння відносно оптичної густини атмосфери за трасою візування при прямому розсіянні:

$$(\beta L)^2 - \beta L + \frac{L\chi}{C_{AA}} = 0$$

та

$$\beta = \frac{1}{L} \left( \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{L\chi}{C_{AA}}} \right). \quad (4)$$

Використовуючи дані, отримані при налагодженні та калібруванні макетного зразка модуля з використанням середовища штучно-тестового туману в конструкторській побудові нефелометричного сенсора,

$$\beta = \beta_k = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}, \quad U = U_k = 0,57 \text{ В},$$

$$U_{\max} = 10 \text{ В}, \quad U_{ШЗ} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ В},$$

маємо для сталої нефелометричного сенсора

$$C_{AA} = \frac{(U_k - U_{\phi C})}{(U_{\max} - U_{\phi C}) \beta_k} = 8,89 \text{ і}.$$

Таким чином, виконавши процес вимірювання, фіксуємо вихідну напругу  $U$ , далі згідно з відомими розрахунковими співвідношеннями визначаємо скоректований показник розсіяння  $\beta$  ( $k$ -фактор), прозорість атмосфери  $P$  та метеорологічну дальність видимості МДВ відповідно:  $P = \exp(-\beta)$  на одиницю  $L$ ; МДВ =  $3/\beta$ . Слід підкреслити, що репрезентативність визначення скоректованого показника розсіяння випромінювання в рамках запропонованої аналітичної моделі (4) у порівнянні із загальноприйнятою (1) виявляється вищою, оскільки використовується траєкторія візування  $L$ .

Як основу структурної побудови БВ і БФП вибрано запропоновану в [5] реалізацію нефелометричного оптоелектронного датчика МДВ. Розроблений базовий модуль метео- та екологічного моніторингу відрізняється конструкцією оптичної системи БВ, використанням у БФП фотодіода Hamamatsu S2386-8K, а також досягнутими за рахунок детального налагодження електронних вузлів покращеними значеннями граничних вихідних параметрів:  $U_{\max} = 10 \text{ В}$  та  $U_{ШЗ} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ В}$ .

Структурну схему оптичної системи оптоелектронного базового модуля наведено на рис. 2. Вона складається з оптичного вузла БВ I та оптичних вузлів БФП в реалізації нефелометричного II і трансмісометричного III сенсорів і містить ІЧ світлодіод Edixeon EDSI-1LC3-03 (довжина хвилі в максимумі випромінювання  $\lambda = 850$  нм) з ламбертівською діаграмою випромінювання 2, концентратор випромінювання 3, збиральну лінзу 4, діафрагми 5, 11, 18, конденсори 6, 9, 16, захисне скло 7, 8, 15, ІЧ фільтр 10, 17, фотодіодний приймач 12, 19, поглинаючий нейтральний фільтр НС 14. На рисунку також схематично наведено вимірювальний об'єм IV в конструкторській побудові нефелометричного сенсора та електронні вузли 1, 13 та 20.

Проектування оптичної системи оптоелектронного базового модуля в реалізації нефелометричного сенсора виконується на основі вибраного розміру вимірювального об'єму  $V$ , конструкційного параметра  $l = 51$  см – відстані від центра робочого об'єму до головної оптичної площини конденсора 6 БВ, діаметра точкового джерела світла – отвору діафрагми 5  $d_d = 4$  мм, на який концентратор 3 та лінза 4 фокусують випромінювання світлодіода. З припущенням, що світловий потік від випромінювача та розсіяний світловий потік до фотоприймача в області перерізу модулюються циліндрами рівного радіуса  $R$ , осі яких лежать в одній площині і перетинаються під кутом  $\theta$ , розмір вимірювального об'єму (загальна частина перетинання двох циліндрів) визначається за принципом Кавальєрі [6]:

$$V = \frac{16 R^3}{3 \sin \theta}.$$

При значеннях  $V \approx 10^2$  см<sup>3</sup> та  $\theta = 35^\circ$ , що забезпечують достатньо високу репрезентативність оптичних властивостей атмосферного середовища в широкому діапазоні вимірювань  $\beta$  (МДВ) [5], діаметр світлових пучків  $D_{II} = 2R \approx 40$  мм.

Протяжний колімований пучок потрібного діаметра  $D_{II}$  формується оптичною системою блока I (рис. 2) з трилінзовим конденсором 6, який забезпечує у порівнянні з дволінзовим конденсором більш рівномірне по перерізу засвічення вимірювального об'єму та складається з однакових короткофокусних встановлених упритул плоско-опуклих лінз. У фокальній площині конденсора із загальною оптичною силою 22 дптр розташована діафрагма 5. Розсіяний у вимірювальному об'ємі потік випромінювання фокусується оптичною системою БФП з дволінзовим конденсором 9 крізь діафрагму 11 та ІЧ фільтр, що мінімізує фонове засвічення, на чутливу ділянку фотодіода. Для зменшення інтенсивності випромінювання на захисному склі 15 ідентичної за виконанням оптичної системи БФП у побудові трансмісометричного сенсора III встановлено поглинаючий нейтральний фільтр. Для додаткового захисту від фонового засвічення та атмосферного забруднення встановлено металеві бленди.

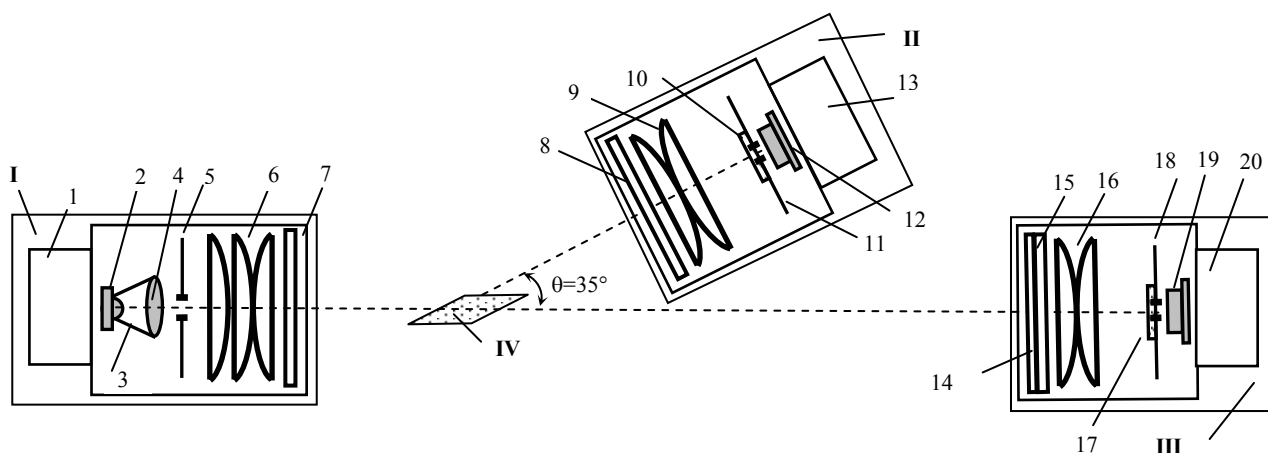


Рис. 2. Оптоелектронний базовий модуль у конструкторській побудові нефелометричного і трансмісометричного сенсорів.

### 3. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Наведемо основні параметри макетного зразка базового модуля в реалізації нефелометричного сенсора:

- |   |  |
|---|--|
| 1) показник розсіяння випромінювання ( $k$ -фактор) | $7,3 \cdot 10^{-5} \dots 1,3 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-1}$ ; |
| 2) прозорість атмосфери (на 1 км шару повітря)      | $0 \dots 0,93$ ;   |
| 3) метеорологічна дальність видимості               | $23 \dots 41000 \text{ м}$ ;                                 |
| 4) стала нефелометричного сенсора                   | $8,9 \text{ м}$ ;  |
| 5) траскторія візування                             | $0,91 \text{ м}$ .   |

Трансмісометричний сенсор на основі базового модуля вимірює потік  $F_{\text{ПР}}$ , що пройшов шар атмосферного повітря на вимірювальній базі  $L_{\text{П}}$ , при його зондуванні колімованим пучком діаметра  $D_{\text{П}}$  (рис. 1б) потоку випромінювання  $F_0$ . Наявність в шарі повітря виключно твердих аерозольних частинок елементарного вуглецю (сажі) викликає у видимій та ближній ІЧ області спектра ефект абсолютного рівнозначного поглинання випромінювання [7], ступінь якого визначається масовою концентрацією частинок і який характеризується коефіцієнтом пропускання згідно із законом Бугера–Ламберта. Компанією Magee Scientific експериментально встановлено, що осідання частинок сажі, що знаходяться в  $1 \text{ м}^3$  з масовою концентрацією  $d = 6 \cdot 10^{-8} \text{ г/м}^3$ , на прозорому оптичному фільтрі у вигляді однорідного шару еквівалентно коефіцієнту пропускання  $\tau_1 = 0,99$ .

Звертаючись до рис. 1б, вважаємо, що частинки сажі з масовою концентрацією  $d_x$ , що знаходяться у вимірювальному об'ємі  $V_{\text{П}}$ , який обмежується колімованим пучком випромінювання між БВ і БФП, умовно осідають у БФП на оптичний фільтр з діаметром  $D_{\text{К}}$ , утворюють шар сажі та зумовлюють еквівалентний коефіцієнт пропускання  $\tau_{\text{П}}$ . Тоді досить легко показати, що

$$d_x = \frac{4m_1}{\pi D_{\text{К}}^2 L_{\text{П}}} \cdot \frac{\ln \tau_{\text{П}}}{\ln \tau_1}, \quad (5)$$

де  $m_1$  – маса частинок сажі, що припадає на  $1 \text{ м}^3$  при  $d = 6 \cdot 10^{-8} \text{ г/м}^3$ .

Створюючи у трансмісометричному сенсорі достатньо малу вимірювальну базу  $L_{\text{П}} = 2 \text{ м}$ , остаточно отримуємо простий вираз

$$d_x = -1,73 \cdot 10^{-3} \ln \tau_{\text{П}} \text{ [г/м}^3\text{]}. \quad (6)$$

Таким чином, трансмісометричний сенсор на основі базового модуля дозволяє шляхом зведення за формулою (2а) помірного поточного значення вихідної напруги БФП до максимального з урахуванням  $U_{\text{ШЗ}}$  отримати коефіцієнт пропускання  $\tau_{\text{П}}$  і наступним кроком згідно з (6) визначити масову концентрацію аерозольних частинок сажі в навколишньому повітрі.

Надамо основні параметри, які визначаються базовим модулем у реалізації трансмісометричного сенсора:

- |   |  |
|---|--|
| 1) коефіцієнт пропускання                           | $10^{-3} \dots 0,99$ ;                                       |
| 2) масова концентрація сажі (елементарного вуглецю) | $1,73 \cdot 10^{-5} \dots 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^3$ ; |
| 3) вимірювальна база                                | $2 \text{ м}$ .  |

Розроблений на основі базового модуля трансмісометричний сенсор при введенні до складу вимірювально-приладних засобів можна широко використовувати для моніторингу викидів в атмосферу аерозольної сажі, які створюються в результаті горіння дизпалива, вугілля, деревини при русі транспорту, роботі теплоелектроцентралей та інших локальних джерел у міських промислових зонах, у житлових районах, сільській місцевості, у тунелях та автомагістралях з потужним рухом.

#### 4. ВИСНОВКИ

Розроблено і створено оптоелектронний базовий модуль сенсорних систем метео- та екологічного моніторингу атмосферного середовища. Модуль складається з двох уніфікованих блоків випромінювача і фотоприймача та дозволяє проводити приладну реалізацію нефелометричного і трансмісометричного сенсорів. Сенсори на основі базового модуля забезпечують з високими технічними характеристиками визначення і контроль прозорості атмосфери,  $k$ -фактора, МДВ і масової концентрації у повітрі твердих аерозольних частинок сажі.

**V.S. Kretulis, I.E. Minakova, P.F. Oleksenko**

#### **OPTOELECTRONIC BASIC MODULE OF SENSOR SYSTEMS FOR METEOROLOGICAL AND ECOLOGICAL MONITORING**

Optoelectronic base module of the sensor systems for meteorological and ecological atmosphere monitoring that consists of two uniform blocks of emitter and photodetector has been designed and created. The realization of these units is based on combination of nephelometric and transmissometric methods. Implemented through the basic module sensors provide high performance identification and control of atmospheric transparency,  $k$ -factor, meteorological visibility and solid aerosol soot particles concentration in air.

**Keywords:** optoelectronic sensor, meteorological visibility, nephelometer, transmissometer, extinction coefficient, atmospheric condition monitoring.

1. Гаврилов В.А. *Видимость в атмосфере*. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 324 с.
2. Баранов А.М. *Видимость в атмосфере и безопасность полетов*. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 206 с.
3. Борен К., Хафмен Д. *Поглощение и рассеяние света малыми частицами*. М.: Мир, 1986. 660 с.
4. Ковалев В.А. *Видимость в атмосфере и ее определение*. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 216 с.
5. Кретулiс В.С., Мiнакова I.Є., Олексенко П.Ф. Оптоелектронний датчик метеорологічної дальності видимості. *Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка*. 2013. Вып. 48. С. 105–112.
6. Понарин Я.П. *Элементарная геометрия*. Т.2: Стереометрия, преобразования пространства. М.: Изд. МЦНМО, 2006. 256 с.
7. Грин Х., Лейн В. *Аэрозоли: пыли, дымы и туманы*. М.: Мир, 1972. 428 с.

Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова  
НАН України  
41, проспект Науки,  
03680 Київ, Україна

Отримано 07.07.2016