

**В.С. Кретулiс, I.Є. Мiнакова, П.Ф. Олексенко**

## **ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ ДАТЧИК МЕТЕОРОЛОГIЧНОЇ ДАЛЬНОСТI ВИДИМОСТI**

Розроблено i створено макетний зразок нефелометричного оптоелектронного датчика метеорологiчної дальностi видимостi (МДВ), що функцiонує в ближнiй IЧ-областi ( $\lambda = 850$  нм) зовнi смуг поглинання вологи i мiстить три базових елементи: випромiнювач, фотоприймач та чутливий досліджуваний об'єм атмосферного повітря. Проведенi за розробленими методиками експериментальнi дослідження основних характеристик вiдкалиброваного датчика з використанням генератора штучно-тестового туману довели широкий динамiчний дiапазон його вимiрювання (вiд 27 м до 35 км) та очiкувано збiльшену достовiрнiсть результатiв вимiрювання при МДВ  $\geq 20$  км. Розроблений датчик можна рекомендувати для застосування як базову одиницю створення сучасного автоматизованого вимiрювача МДВ для дорожнiх служб, автомобiльного, повiтряного i водного транспорту при органiзацiї їх безпечної роботи.

**Ключовi слова:** оптоелектронний датчик, метеорологiчна дальнiсть видимостi (МДВ), нефелометр, показник розсiяння, перетворювач.

### **ВСТУП**

Поелементний метеорологiчний монiторинг стану атмосфери має велике практичне значення для низки галузей матерiального виробництва та життєдiяльностi людини. Надзвичайно важливим i необхiдним є визначення одного з основних метеоелементiв — метеорологiчної дальностi видимостi (МДВ) — для дорожнiх служб, для автомобiльного i повiтряного транспорту, оскiльки сприяє органiзацiї їх безпечної роботи. Закордонний та вiтчизняний досвiд органiзацiї працi повiтряного транспорту свiдчить, що серед несприятливих метеоумов обмежена видимiсть (менш за 3 км) є головною причиною бiльшостi аварiйних випадкiв [1].

Основною метою постановки та виконання даної працi є розробка i створення оптоелектронних приладних сенсорних засобiв (датчикiв) з високими технiчними й експлуатацiйними характеристиками, що дають змогу отримувати достовiрнi та надiйнi данi з вимiрювання МДВ у широкому динамiчному дiапазонi та забезпечують оцiнювання фiзичного стану приземного шару атмосфери в рiзних погодних категорiях. При цьому пiд оптоелектронним датчиком метеорологiчної дальностi видимостi (ОЕД МДВ) мається на увазi комплексний приладний засiб, який конструкцiйно поєднує власне оптоелектронний сенсор дальностi видимостi та спряжений з ним блок первинних вимiрювальних перетворювачiв iнформацiї в зручну для реєстрацiї вихiдну електричну форму i значення змiнної напруги.

### **СТРУКТУРНА ПОБУДОВА ОЕД МДВ**

Побудова розробленого оптоелектронного сенсора МДВ ґрунтується на концепцiї нефелометричного метода [2], що базується на ефектi спрямованого прямого розсiяння в досліджуваному атмосферному середовищi.

У переважнiй бiльшостi метеорологiчних ситуацiй значне погiршення видимостi пов'язане з такими атмосферними явищами, як дощ, снiгопад,

© В.С. Кретулiс, I.Є. Мiнакова, П.Ф. Олексенко, 2013

водний пи́л, серпанок, імла тощо. Дисперсна фаза цих природних аеросупензій складається з окремих частинок, різних за мікроструктурою та оптичними властивостями. Водночас МДВ визначається переважно мікроструктурою частинок води у вигляді крапель або кристалів [3]. Як відомо, вода мало поглинає випромінювання видимого та ближнього ІЧ-спектра, тому МДВ зумовлена закономірностями розсіяння світла в атмосфері.

Виходячи з цих положень, зрозуміло, що розроблений ОЕД МДВ функціонує в ближній ІЧ-області зовні смуги поглинання вологи. Його оптична схема (рис. 1) містить три базових елементи: ІЧ-випромінювач, фотоприймач випромінювання та чутливий (досліджуваний) об'єм атмосферного повітря. ІЧ-випромінювач формує переривистий з заданою частотою колімований променистий потік випромінювання. Фотоприймач перетворює розсіяний в прямому напрямі під встановленим кутом  $\theta$  променистий потік в інформаційний аналоговий сигнал, що надається вихідною змінною напругою. ІЧ-випромінювач і фотоприймач розташовані на базі один проти одного під кутом  $(180 - \theta)^\circ$ . Конструктивно корпуси модулів випромінювача і фотоприймача з боку оптичних вікон доповнюються блендами з кутом зрізу  $\theta/2$  для захисту від зовнішніх паразитних засвічень. При заданих значеннях конструкційних параметрів ОЕД МДВ напруга на виході фотоприймача залежить від розсіювальної оптичної здатності атмосферного середовища, що досліджується, і, отже, від його показника розсіяння випромінювання  $\beta$  колімованого потоку. Водночас і МДВ визначається показником розсіяння випромінювання в атмосфері. Таким чином, напруга на виході сенсора однозначно містить інформацію про МДВ атмосферного середовища.

Загальна структурна побудова розробленого ОЕД МДВ визначається схемою модуля ІЧ-випромінювача (рис. 2) і схемою модуля фотоприймача (рис. 3). Електронний вузол модуля ІЧ-випромінювача складається з керованого драйвера з часовою стабілізацією амплітуди прямокутних імпульсів (зі шпаруватістю 2) ІЧ-випромінювання заданої потужності, що містить ГЗІ, КНГПС, ФІС, ССПВ, а також функціонально самостійного блоку стабілізації температури теплоносія з розміщенням на ньому ІЧ-випромінювачем. Схематично наданий оптичний вузол ІЧ-випромінювача містить конденсор з двох короткофокусних плоско-опуклих лінз, який формує випромінювання від ІЧ-світлодіода EDSI-1LC3-03 з ламбертівською діаграмою за допомогою концентратора, додаткової збиральної лінзи та діафрагми в колімований пучок світла діаметром  $\sim 3,5$  см. Зазначимо, що такий самий конденсор у складі оптичного вузла фотоприймачального модуля фокусує увесь потік розсіяного в досліджуваному об'ємі випроміню-

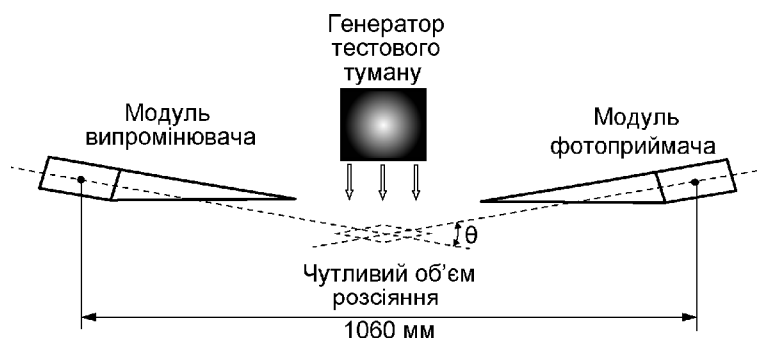


Рис. 1. Структурна схема спрямованого нефелометричного ОЕД МДВ (генератор тестового туману використовується для калібрування датчика)

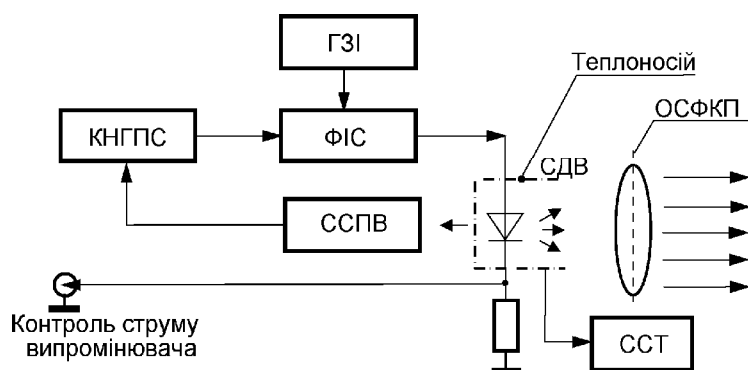


Рис. 2. Структурна схема модуля ІЧ-випромінювача ОЕД МДВ: ГЗІ — генератор задавальних імпульсів; КНГПС — керований напругою генератор постійного струму; ФІС — формувач імпульсів струму світлодіода; ССПВ — система стабілізації потужності потоку випромінювання; СДВ — світлодіодний випромінювач; ОСФКП — оптична система формування колімованого пучка; ССТ — система стабілізації температури розташованого на теплоносії випромінювача

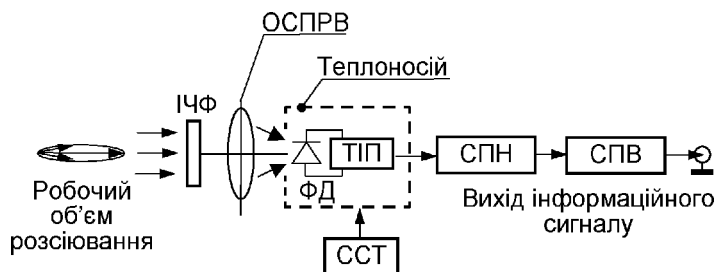


Рис. 3. Узагальнена структурна схема модуля фотоприймача ОЕД МДВ: ІЧФ — інфрачервоний фільтр; ОСПРВ — оптична система приймача розсіяного випромінювання; ФД — фотодіодний приймач; ТІП — вбудований гібридний трансімпедансний перетворювач; ССТ — система автоматичного регулювання температури; СПН — селективний підсилювач низькодобротний; СПВ — селективний підсилювач високдобротний

вання і рівномірно розподіляє його по фоточутливій ділянці фотодіода. ІЧ-фільтр з оптичного скла КС18, розташований безпосередньо перед фотоприймачем, поглинає паразитне зовнішнє засвічення сонячними променями.

Фотоприймальний модуль ОЕД МДВ сприймає та реєструє з перетворенням прямокутні імпульси розсіяного в напрямку під кутом  $\theta$  чутливим об'ємом потоку ІЧ-випромінювання. Він структурно складається з оптичного вузла, фотодіода, встановленого на термостабілізованій підкладці (теплоносії), комплексного блоку високочутливого трансімпедансного селективного перетворювача, схеми температурної стабілізації фотоструму. Задання режимів ІЧ-випромінювача (амплітуди потужності випромінювання, робочої температури) і фотодіода (робочої температури) здійснюється програмно за допомогою ПК.

Вибір кута розсіювання  $\theta$  у конструктивному рішенні ОЕД МДВ визначається компромісом між динамічним діапазоном і необхідною похибкою вимірювання МДВ. При динамічному діапазоні МДВ 30 м—10 км і відносній похибці вимірювання  $\sim 10\%$  оптимальний кут становить  $35^\circ$  [4].

При розробці інструментальних засобів вимірювання МДВ на основі нефелометричного метода використовують наступне співвідношення, що походить з формули Кошмідера [5] та прийнятого стандартного зна-

чення порогу контрастної чутливості ока спостерігача  $\varepsilon = 0,05$ :

$$S_M = 3 / \beta(0,55), \quad (1)$$

де  $S_M$  і  $\beta(0,55)$  за визначенням характеризують відповідно видимість і показник розсіяння атмосфери для видимого випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 0,55$  мкм.

ОЕД МДВ створює колімований пучок випромінювання з  $\lambda_C = 0,85$  мкм і, оскільки таке випромінювання практично не поглинається водною аеросупензією,  $\beta(0,85) \approx \beta(0,55) \approx \beta$ .

Вважають, що показник розсіяння  $\beta$  пов'язаний з променистим потоком розсіяння  $F(\theta)$  від робочого об'єму в напрямі кута розсіяння  $\theta$  через коефіцієнт пропорційності  $k_F$  співвідношенням

$$\beta = k_F \cdot F(\theta). \quad (2)$$

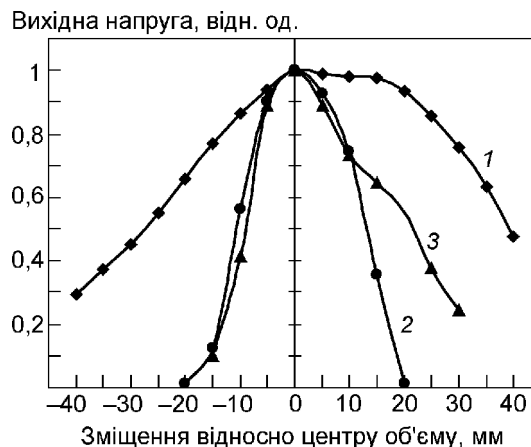
Потік розсіяння  $F(\theta)$  реєструється фотоприймальним модулем ОЕД МДВ на своєму оптичному вході та досягає максимального значення  $F_{\max}$  при мінімальному в динамічному діапазоні значенні МДВ<sub>min</sub>. При збільшенні дальності видимості потік розсіяння слабшає, що виявляється через коефіцієнт ослаблення потоку розсіяння  $\chi = F(\theta) / F_{\max}$ . Тоді вираз (2) набуває вигляду

$$\beta = k_F F_{\max} \chi. \quad (3)$$

### **КАЛІБРУВАННЯ ОЕД МДВ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Основні характеристики датчиків МДВ експериментально досліджували щодо визначення структури чутливого об'єму, коефіцієнта перетворення, вольт-ватної характеристики та динамічного діапазону вимірюваних значень МДВ. Для проведення калібрування датчиків у лабораторних умовах необхідно мати чітке уявлення про розміри чутливого об'єму та просторовий розподіл локальної чутливості датчика. Ці характеристики були визначені за допомогою зонда-розсіювача випромінювання колімованого первинного потоку. Зонд мав форму сфери діаметром 4 мм, виготовленої з пінополіуретану і закріпленої на торці тонкого металевого стрижня, пофарбованого у чорний колір. Другий кінець стрижня був закріплений на координатному механізмі, який давав змогу переміщувати зонд у зоні чутливого об'єму в трьох взаємоперпендикулярних напрямках:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Координата  $X$  відповідала переміщенню зонда вздовж напрямку випромінювач—приймач, координата  $Y$  — переміщенню зонда в горизонтальній площині, напрямком якої перпендикулярний до осі  $X$ , а координата  $Z$  — переміщенню у вертикальній площині. Локальна чутливість датчика залежно від названих координат оцінювалась за вихідною напругою  $U$  блоку вимірювальних перетворювачів. Початок системи координат відповідав розташуванню зонда в зоні максимального значення  $U_{\text{ц}}$ . За отриманими даними розподілу локальної чутливості датчика побудовано координатні характеристики чутливого об'єму (рис. 4). Зміщення зонда відносно центра чутливого об'єму відкладені по осі абсцис, а по осі ординат — відповідні значення зведеної напруги на виході блоку вимірювальних перетворювачів  $U/U_{\text{ц}}$ . З рисунка видно, що зона максимальної просторової чутливості дещо зміщена відносно геометричного центра чутливого об'єму, а загальні розміри чутливого об'єму дають змогу розташовувати його при калібрувці в потоці штучно-тестового туману з поперечним перерізом  $\sim 7 \times 12$  см.

Рис. 4. Координатні характеристики розподілу локальної чутливості ОЕД МДВ: 1 — координата X; 2 — координата Y; 3 — координата Z



Експериментально досліджувати основні метрологічні характеристики розробленого датчика МДВ в лабораторних умовах доцільно за допомогою штучно-тестового туману, беручи до уваги наступні обставини. По-перше, такі дослідження дають змогу суттєво зменшити трудові і фінансові витрати та робочий час на їх виконання.

По-друге, у відсотковому співвідношенні датчики МДВ найчастіше використовуються в умовах природних туманів та густих серпанків, коли МДВ залежить здебільшого від закономірностей розсіяння світла на краплях водяного аерозолі. По-третє, мікрофізичні та оптичні властивості природних туманів успішно моделювалися в лабораторних умовах за допомогою стаціонарних і потокових камер штучного туману. По-четверте, показник розсіяння для штучного туману можна з прийнятною точністю визначити з експериментального дослідження його мікроструктури та розрахунків.

Показник розсіяння  $\beta$  тестового штучно створеного туману визначається як [6]

$$\beta = \sum_i \beta_i = \frac{\pi}{2} \sum_i d_i N_i Q_i, \quad (4)$$

де  $\beta_i$ ,  $d_i$ ,  $N_i$  та  $Q_i$  — середні значення відповідно показника розсіяння, діаметра, концентрації та фактора ефективності розсіяння для  $i$ -ї фракції розподілу крапель за розмірами.

Оскільки мікроструктура штучного туману змінюється з часом через випаровування та седиментацію крапель, задля збереження незмінними  $d_i$  та  $N_i$  у заданому об'ємі використовують потокову камеру туману. Тому під час калібрування чутливий об'єм датчика розміщують саме в потоці штучного туману, а вимірювання  $d_i$  та  $N_i$  здійснюють в межах чутливого об'єму. Для цього достатньо скористатися вивіреною методом інерційного уловлювання крапель вузькою тонкою пластинкою, яка експонується в потоці туману.

Проби крапель, які були взяті на пластинку на виході каналу, фотографувались під мікроскопом. Розміри крапель визначали з мікрофотографій за допомогою окулярної лінійки. Розподіл крапель за розмірами припадав на діапазон від 8 до 100 мкм, а концентрація  $N_i$  досягала максимального значення при  $d_i \approx 16$  мкм. Для визначення фактора ефективності розсіювання використовувалась уточнена формула Ван де Хюлста [3] при  $\lambda = 0,55$  мкм. За цими даними обчислений за формулою (4) показник розсіяння  $\beta_k$  тестового туману становив  $6,4 \text{ км}^{-1}$  (МДВ =  $0,47 \text{ км}$ ). При цьому відносна похибка  $\delta_\beta \approx 11 \%$ .

При дослідженнях основних метрологічних характеристик макетного зразка датчика МДВ перш за все визначали його вольт-ватну характеристику, яка є залежністю напруги на виході фотоприймального модуля від потоку розсіяного випромінювання  $F(\theta)$ , змодельованого розташован-

ним в чутливому об'ємі джерелом. Максимальний потік розсіяння  $F_{\max}$  створювався за допомогою зонда — білої бавовняної нитки, яка перетинала чутливий об'єм перпендикулярно до напрямку випромінювач—приймач. Значення  $F_{\max}$  визначали, переміщуючи зонд у чутливому об'ємі по верхній межі лінійного режиму  $U_{\max}$  блоку вимірювального перетворювача фотоприймального модуля. Поточні значення  $F(\theta)$  задавалися нейтральними світлофільтрами типу НС (з набору світлофільтрів ГОСТ 9411—81), які встановлювалися перед вхідним вікном оптичної системи модуля. При цьому використовувалися фільтри НС1, НС3, НС6, НС7, НС8 з коефіцієнтами пропускання, що вимірювалися на робочій довжині хвилі модуля випромінювача  $\lambda = 850$  нм. Побудовану з отриманих даних вольт-ватну характеристику (залежність зведеної вихідної напруги від коефіцієнта ослаблення потоку розсіяння) наведено на рис. 5. Зауважимо, що в межах трьох порядків характеристика має лінійний характер і в цих координатах описується лінійною залежністю вигляду

$$\frac{U}{U_{\max}} = \left(1 - \frac{U_{\text{шз}}}{U_{\max}}\right) \gamma + \frac{U_{\text{шз}}}{U_{\max}}, \quad (5)$$

де  $U_{\text{шз}}$  — середньоквадратичне значення напруги шумів і завод на виході фотоприймального модуля при закритому оптичному вході.

Оскільки фотоприймальний модуль забезпечує лінійне перетворення потік розсіяння—вихідна напруга (5), то з урахуванням  $F(\theta) = \gamma F_{\max}$  і виразу (3) для показника розсіяння  $\beta$  на базі прийнятого визначення МДВ (1) отримуємо

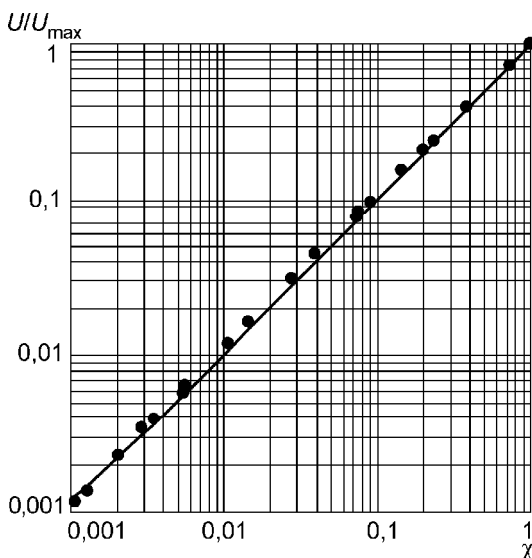
$$S_M = \frac{3(U_{\max} - U_{\text{шз}})}{k_F F_{\max}} \cdot [U - U_{\text{шз}}]^{-1}, \quad (6)$$

де  $k_F$  — стала датчика.

Параметр перед квадратними дужками в (6) — коефіцієнт перетворення датчика МДВ у конкретному макетному виконанні:

$$K_{\text{дв}} = \frac{3(U_{\max} - U_{\text{шз}})}{k_F F_{\max}}.$$

Коефіцієнт перетворення  $K_{\text{дв}}$  визначали калібруванням з використанням штучно-тестового туману. Генерований тестовий туман з показником розсіяння  $\beta_k = 6,4 \cdot 10^{-3}$  м,



що відповідало згідно з (1)  $S_{\text{мк}} = 470$  м, викликав такий потік розсіювання від чутливого об'єму, який реєструвався фотоприймальним модулем з усередненою (з кількості вимірювань  $n = 40$ ) вихідною напругою  $U_k$ . Зазначимо, що характеристичні значення вихідної напруги для макетного зразка датчика ОЕД МДВ становили  $U_k = 0,548$  В,  $U_{\max} = 9,6$  В,  $U_{\text{шз}} = 1,8 \cdot 10^{-3}$  В.

З (6) випливає, що коефіцієнт перетворення можна виразити через характеристичні

Рис. 5. Вольт-ватна характеристика ОЕД МДВ

значення і  $S_{MK}$ :

$$K_{дв} = S_{MK} (U_k - U_{шз}),$$

тоді

$$K_{дв} = 2,57 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{В}.$$

Знаючи коефіцієнт перетворення, легко отримати аналітичний вираз характеристики перетворення ОЕД МДВ:

$$S_M = 2,57 \cdot 10^2 (U - 0,0018)^{-1} \text{ м} \cdot \text{В}. \quad (7)$$

Згідно з (7) визначаємо нижню  $S_{Mmin}$  і верхню  $S_{Mmax}$  очікувані межі діапазону вимірювання МДВ, причому верхня межа встановлювалась з похибкою 20 % при вихідній напрузі модуля  $U_{p3}$ , яка передбачала його впевнене розділення на рівні шумів  $U_{p3} \approx 5 U_{шз}$ :

$$S_{Mmin} = 26,7 \text{ м}, \quad S_{Mmax} = 35,7 \text{ км}.$$

Нижче наведено основні технічні параметри ОЕД МДВ:

Потужність випромінювання СД при $I_{CD} = 700 \text{ мА}$ та температури $p-n$ -переходу $t_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	300 мВт
Амплітуда прямокутних однополярних імпульсів струму крізь ІЧ-випромінювач (програмно задається з ПК у діапазоні 0,3—0,6 А)	0,5 А
Частота слідування прямокутних однополярних імпульсів струму випромінювача при шпаруватості 2	2,7 кГц $\pm$ 0,1 %
Робоча температура ІЧ-випромінювача	(35—50) $^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
Робоча температура фотодіодного приймача ІЧ-випромінювання	(50 $\pm$ 2) $^\circ\text{C}$
Коефіцієнт перетворення	$K_{дв} = 2,57 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{В}$
Динамічний діапазон вимірювання МДВ	27 м—35 км
Відносна похибка вимірювання МДВ	
при МДВ < 5 км	$\delta(\text{МДВ}) \sim 10 \text{ } \%$
при МДВ $\sim$ 20 км	$\delta(\text{МДВ}) \sim 20 \text{ } \%$
Габаритні розміри	
висота	170 мм
ширина	130 мм

## ВИСНОВКИ

Проведені за розробленими методиками експериментальні дослідження основних характеристик відкаліброваного ОЕД МДВ з використанням штучного-тестового туману довели широкий (до трьох порядків) динамічний діапазон вимірювання створеного датчика та високу розподільну здатність визначення МДВ при значеннях  $\geq 20 \text{ км}$  [7].

Розроблений датчик можна використовувати як основний інструментальний засіб при створенні сучасного автоматизованого вимірювача МДВ для організації безпечної роботи всіх видів транспорту, при проведенні сільськогосподарських, будівельних, геологорозвідувальних і топографічних робіт, аерозйомки, випробувань військової техніки, моніторингу навколишнього середовища та ін.

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

### OPTOELECTRONIC SENSOR OF METEOROLOGICAL VISIBILITY

Nephelometric optoelectronic sensor of meteorological visibility is designed and created. It operates in the near infrared region ( $\lambda = 850 \text{ nm}$ ) outside the moisture absorption band and contains three basic elements: emitter, photodetector and sensitive investigational volume of air. Based on the developed techniques experimental studies of the basic

characteristics of calibrated sensor with using artificial test fog generator have shown wide dynamic measurement range (from 27 m to 35 km) sensor and expected increased reliability of measurement results at values visibility above 20 km. The developed sensor can be recommended for use as a basic unit to create a modern automated meteorological visibility meter for road services, road, air and water transport to organize their work safely.

**Keywords:** optoelectronic sensor, meteorological visibility, nephelometer, extinction coefficient, converter.

1. *Баранов А.М.* Видимость в атмосфере и безопасность полетов. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 206 с.
2. *Ковалев В.А.* Видимость в атмосфере и ее определение. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 216 с.
3. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. — М.: Мир, 1986. — 660 с.
4. *Бартенева О.Д., Довгяло В.И., Полякова В.А.* Экспериментальное исследование оптических свойств приземного слоя атмосферы // Тр. ГТО. — 1967. — Вып. 220. — С. 101—162.
5. *Гаврилов В.А.* Видимость в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. — 324 с.
6. *Розенберг Г.В.* Электродинамика статически неоднородных сред и теория переноса // Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. — Минск, 1971. — С. 159—170.
7. *Оптоэлектронный сенсор метеорологической дальности видимости / Кретулис В.С., Олексенко П.Ф., Минакова И.Е.* // Тез. доп. V Міжнародної наук.-техн. конф. «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології», Україна, Одеса. — 2012. — С. 209.

Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова  
НАН України  
Проспект Науки, 41  
03028 Київ

Отримано 15.04.2013