

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

## ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ МОНОМОДУЛЬНИЙ ДАТЧИК МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ДАЛЬНОСТІ ВИДИМОСТІ ТА ПРОЗОРОСТІ АТМОСФЕРИ З АВТОМАТИЧНОЮ КОРЕКЦІЄЮ ВПЛИВУ ЗОВНІШНЬОГО ЗАБРУДНЕННЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Розроблено та створено макетний зразок моноמודульного апаратно-програмного оптоелектронного датчика  $k$ -фактора, метеорологічної дальності видимості і прозорості атмосфери з високими техніко-експлуатаційними характеристиками малогабаритного виконання. Поєднання в алгоритмі функціонування розроблених апаратно-програмних методів реалізації датчика забезпечило підвищення точності та інваріантності результатів вимірювання відносно зовнішнього фонового засвічення і самотестування з автоматичною корекцією впливу забруднення оптичних вікон датчика. Постійний моніторинг ступеня забрудненості оптичних вікон забезпечує можливість у разі виявлення перевищення допустимого рівня забруднення надання оператору інформації про необхідність проведення профілактичних робіт. Запропонована методика автоматичної корекції забруднення оптичних вікон або повністю виключає, або значно збільшує часову періодичність проведення операцій їхнього механічного очищення, що скорочує трудовитрати з технічного обслуговування датчика. Виконаний аналіз технічних можливостей вузлів макетного зразка датчика дозволив оцінити його базові метеопараметри в межах величин: з  $k$ -фактора –  $(0,17 \div 1,11 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^{-1}$ , з метеорологічної дальності видимості –  $(18 \div 27 \cdot 10^3) \text{ м}$  та з прозорості атмосфери на 1 км шару –  $(0 \div 0,895)$ . Розроблений метеорологічний датчик може використовуватися як базовий дистанційно керований інструментально-вимірювальний засіб визначення метеопараметрів стану атмосферного середовища на державних гідрометеостанціях країни, мобільних пересувних метеостанціях, стаціонарних метеопостах дорожніх- і авіаслужб задля забезпечення гарантованої безпеки праці робітників усіх видів транспорту.

**Ключові слова:** оптоелектронний датчик, метеорологічна дальність видимості, прозорість атмосфери, показник розсіяння, нефелометр.

### 1. ВСТУП

У вітчизняній практиці проведення метеорологічного та екологічного моніторингу стану навколишнього атмосферного середовища за основними метеоелементами, такими як метеорологічна дальність видимості та прозорість приземного шару атмосфери, повністю відсутні компактні, моноמודульні, малогабаритні приладно-вимірювальні засоби, які з високими техніко-економічними характеристиками відповідали би вимогам мобільності і оперативності отримання необхідної метеоінформації для забезпечення безпечної роботи транспорту на автомагістралях, морських маршрутах та злітно-посадкових смугах. Існуючий приладний арсенал засобів метеорологічного моніторингу прийняттого технічного рівня відноситься до стаціонарно встановлених громіздких конструкцій на спеціально підготовлених майданчиках. Крім того, додатково такий арсенал засобів потребує постійного технічного обслуговування, включаючи огляд стану та чищення від пилових забруднень зовнішніх поверхонь оптичних деталей окремих модулів засобів вимірювання, що є достатньо трудомісткою та відповідальною операцією з підтримки працездатності апаратури.

В цьому зв'язку основну ціль постановки та виконання даної роботи складає розробка і створення оптоелектронного моноמודульного апаратно-програмного приладно-вимірювального інструменту (датчика) метеорологічної дальності видимості та прозорості атмосфери із самотестуванням і автоматичною корекцією зовнішнього пилового забруднення вікон оптичних систем та високими техніко-економічними і експлуатаційними характеристиками для оснащення державних гідрометеостанцій країни, метеопостів дорожніх- і авіаслужб, в тому числі пересувних метеолабораторій.

## 2. ПОБУДОВА ДАТЧИКА

Структурною концепцією побудови розробленого оптоелектронного моноמודульного апаратно-програмного метеорологічного датчика (ОМАПМД) є нефелометричний метод прямого розсіяння, що базується на реєстрації розсіяного досліджувальним об'ємом атмосферного середовища потоку випромінювання. При цьому відкритий для вимірювання об'єм  $V$  за відомою оптичною схемою методу [1-3] утворюється взаємодією під кутом розсіяння  $\theta$  двох близьких до колімованих пучків випромінювання – зонduючого та сприймаючого. Зонduючий атмосферний аерозоль пучок формується вузлом випромінювача, а сприймаючий пучок потоку розсіяння – вузлом фотоприймача датчика.

Загальноприйнято вважати [2,3], що у нефелометричному датчику розсіяний від досліджуваного об'єму  $V$  під кутом розсіяння  $\theta$  у напрямку фотоприймача потік  $F(\theta)$  в лінійному наданні відповідає виразу:

$$F(\theta) = k_{oc} F_K V \omega \rho(\theta) \beta_{\theta}, \quad (1)$$

де  $k_{oc}$  – геометричний показник оптичної схеми фотоприймача;

$F_K$  – первинний (на виході вікна) зонduючий досліджувальний об'єм потік випромінювання;

$\omega$  – тілесний кут, з якого розсіяний потік елемента об'єму  $V$  потрапляє на лінзу фотоприймального вузла;

$\rho(\theta)$  – приведене та усереднене значення індикатриси розсіяння випромінювання досліджуваного об'єму у напрямку  $\theta$  [4];

$\beta_{\theta}$  – показник розсіяння атмосферного аерозолу, що відповідає лінійній моделі нефелометричного методу.

Згідно із співвідношенням (1), аналіз взаємодії структурних вузлів ОМАПМД дозволяє встановити, що основними факторами малогабаритності та компактності його конструктивної побудови є допустиме зменшення геометричних розмірів досліджуваного об'єму і трас зондування та візування, що надає можливість скоротити діаметри зонduючого та сприймаючого світлових пучків і відповідно зменшити розміри вікон оптичних систем вузлів. При цьому компенсація зменшення потоку розсіяння  $F(\theta)$  досягається за рахунок використання джерела зонduючого випромінювання з більш високим потоком випромінювання і автоматичного збільшення тілесного кута  $\omega$ .

Умовою, що визначає вибір мінімально можливої величини досліджуваного об'єму розсіяння, є верхня межа прозорості атмосфери, коли метеорологічна дальність видимості (МДВ) максимальна ( $\sim 30 \div 50$  км), а показник розсіяння атмосферного аерозолу мінімальний, причому концентрація завислих оптично активних часток аерозолу складає  $N \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$  з радіусом  $0,1 \div 0,3$  мкм [5]. Тоді для забезпечення незалежності властивостей досліджуваного об'єму від випадкового представництва часток, обираючи згідно з рекомендаціями [6] допустиму відносну похибку показника розсіяння атмосфери  $\delta(\beta) = 10^{-2}$ , визначаємо мінімально можливу величину досліджуваного об'єму в  $\text{см}^3$ :

$$V \geq [\delta(\beta)^2 N]^{-1} = [10^{-4} \cdot 10^3]^{-1} = 10 \text{ см}^3.$$

Виходячи з гарантування репрезентативності оптичних властивостей атмосферного аерозолу в широкому діапазоні вимірювання МДВ і  $\beta$ , обираємо робоче значення  $V$  з запасом, тобто  $V = 20 \text{ см}^3$ . Далі, приймаючи допущення про те, що досліджуваний заданої величини об'єм  $V$  формується зонduючим і сприймаючим пучками циліндричної форми з поперечним перерізом окружності радіуса  $R_{\text{л}}$ , які перетинаються під кутом розсіяння  $\theta$ , і дотримуючись принципу Кавальєрі, знаходимо потрібний радіус пучків:

$$R_{II} = \left[ \frac{3V \sin \theta}{16} \right]^{1/3}.$$

При  $V=20 \text{ см}^3$  і  $\theta=40^\circ$  отримуємо  $R_{II}=1,3 \text{ см}$  та приймаємо до реалізації  $R_{II}=1,25 \text{ см}$ . Відзначимо, що величину кута  $\theta$  обрано з компромісу між похибкою та динамічним діапазоном вимірювання зі зміщенням останнього до області значних МДВ.

Звернемося до повузлового виконання ОМАПМД. Вузол зондуючого імпульсного ІЧ-випромінювання реалізовано за запропонованим в [7] структурним рішенням та містить власне інжекційний ІЧ-світлодіод SFH4715AS (довжина хвилі у максимумі випромінювання  $\lambda_{\text{max}}=860 \text{ нм}$ ), оптичний блок формування колімованого пучка ІЧ-випромінювання стабільної вихідної потужності та блок електроніки. Відмінні особливості вузла зондуючого ІЧ-випромінювання полягають в наявності: 1) в оптичному блоці – дволінзового конденсора, збудованого на пласко-опуклих лінзах діаметром 28 мм з фокусною відстанню 30 мм, і двох додатково розташованих поміж конденсором та вихідним вікном фотодіодів S2605-04, які реєструють потік відбиття всередину від забрудненого вихідного вікна і які є датчиком ступеня його забруднення; 2) в блоці електроніки – потужного керованого формувача прямокутних імпульсів струму крізь ІЧ-світлодіод з амплітудою до 1,2 А в діапазоні температур  $-20 \text{ }^\circ\text{C} \div +50 \text{ }^\circ\text{C}$ , що забезпечує значення первинного зондуючого потоку  $F_K$  близько 260 мВт, а також перетворювача фотоструму датчика відбиття у напругу.

Вузол фотоприймача за трасою візування  $L_6$  в межах сформованого сприймаючого пучка реєструє вхідний інформаційний сигнал у вигляді потоку розсіяння  $F(\theta)$  та перетворює його з компенсацією фонові завади-засвічення у вихідний сигнал в формі змінної напруги. При цьому вузол фотоприймача ОМАПМД будується за відомою схемою [7], яка складається з оптичного блока, вхідного високочутливого трансїмпедансного перетворювача із наднизьким рівнем власного шуму на базі кремнієвого фотодіоду, блока електроніки, що містить селективний підсилювач та запропонований в [8] генератор компенсації фонові завади-засвічення. Відмінною рисою вузла фотоприймача розробленого датчика є наявність в оптичному блоці дволінзового конденсора на пласко-опуклих лінзах діаметром 28 мм з фокусною відстанню 30 мм, що дозволило сформувати (як і у випадку вузла зондуючого випромінювання) пучок, але сприймаючий, діаметром 25 мм, а в блоці електроніки – селективного підсилювача зі збільшеним коефіцієнтом підсилення вихідного інформаційного сигналу.

Важливо відзначити, що кожний з оптичних блоків вузлів ОМАПМД монтується в окремий світлозахисний корпус та розташовується таким чином, щоб їхні оптичні осі просторово знаходилися би у одній вертикальній площині, поверхні зрізів бленд відповідали би суміщеній горизонтальній площині, а величини траси зондування  $L_3$  і траси візування  $L_6$  відповідних світлових пучків були би допустимо мінімальними та рівними, складаючи загальну трасу  $L = L_3 + L_6 = 28 \text{ мм}$ .

### **3. АНАЛІЗ І МЕТОДИКА КОРЕКЦІЇ СТУПЕНЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВІКОН ОМАПМД**

Атмосферні аерозолі як суспензії твердих та рідких часток у газі з розмірами часток від  $10^{-7} \text{ м}$  виникають при диспергуванні речовини і складають атмосферний пил природного та антропогенного походження [9-11]. Природний пил виникає внаслідок звичайних природних процесів вивітрювання ґрунту, вивержень вулканів. Антропогенний пил виникає в процесі господарської діяльності людини при видобутку та переробці корисних копалин, сільськогосподарському виробництві, функціонуванні теплоелектростанцій і автомобільного транспорту, виконанні будівельних робіт, пожежах та інш. Відносна маса атмосферного пилу з розмірами часток  $(0,1 \div 10) \text{ мкм}$  складає в окремих

регіонах до 31 %. На навколишнє середовище найбільше впливають дрібнодисперсні фракції дорожнього та вуличного пилу, які за своїм складом все більше збагачуються кремнеземом, золою, сажею, сполуками кальцію, алюмінію, кадмію, продуктами зносу дорожнього покриття і автомобільних шин, неповного згоряння пального, частками будматеріалів, органічних сполук, важкими металами та іншими складовими.

ОМАПМД, як і будь-який інший оптичний інструмент з вимірювання дальності видимості та прозорості атмосфери, при експлуатації виявляється у безпосередньому контакті з атмосферним середовищем. В силу цього завислі у повітрі аерозольні частки пилу різних речовин осідають у вигляді покриття на зовнішніх поверхнях оптичних вікон вузлів датчика, що веде до їхнього забруднення. Звертаючись до розгляду вузла зондуючого випромінювання, то відзначимо, що випромінюваний ІЧ-світлодіодом повний променистий потік, який формується оптичним блоком у колімований пучок, досягає вихідного вікна і при своєму нормальному падінні зазнає відбиття всередину і поглинання на забрудненому покритті останнього, ослаблюючись за величиною. Як впливає з концепції побудови оптоелектронного нефелометричного датчика прямого розсіяння, величина потужності колімованого пучка ІЧ-випромінювання як носія інформаційного сигналу на даному етапі вимірювання повинна бути строго постійною, і такий стан з наявністю забруднень веде до виникнення похибок у показаннях датчика. Значні забруднення вихідного вікна доводиться з часом усувати механічним засобом у процесі регламентних робіт. Усунення помірних оптичних забруднень нами пропонується починати із самотестування ступеня забруднення з подальшим автоматичним введенням корекції або інструментальним способом (авторегулювання повної потужності джерела зондуючого ІЧ-випромінювання), або програмним способом, здійснюючи перерахунок вимірювальних даних. Відзначимо, що нами при реалізації обрано спосіб програмної корекції.

Уявімо вихідне вікно зондуючого випромінювання як систему „повітря – скляна пластинка – забруднюючий шар – повітря”, що містить два прозорих середовища, які взаємодіють з випромінюванням некогерентно без урахування фазових співвідношень. Фотометричними характеристиками такої системи є коефіцієнти загального відбиття у прямому та зворотному напрямках і коефіцієнт загального пропускання [12], визначення яких виконується через багаторазовість повторення процесів відбиття та поглинання пучка випромінювання.

Аналіз характеристик системи проведемо в рамках наступних умов:

1) – монохроматичність зондуючого пучка випромінювання (напівширина спектральної характеристики випромінювання ІЧ-світлодіода складає 50 нм на рівні 0,5);

2) – скляна пластинка вихідного вікна (як і вхідного вікна вузла фотоприймача) відповідає абсолютно непоглинаючому середовищу (практично скляна пластинка, що використовується, з легкого крону марки К8 при товщині в 1,2 мм має на довжині хвилі  $\lambda=850$  нм коефіцієнт внутрішнього пропускання  $\tau_c=0,998$  і тому можна прийняти  $\tau_c=1$ );

3) – оскільки дорожній пил (в залежності від типу ґрунту) за своїм компонентним складом від 65 % до 95 % складається з кремнезему, то природно припустити, що в процесі осідання він створює на зовнішній поверхні пластинки забруднюючий шар кремнезему, закріплений наддрібнодисперсними частинками олійного аерозолі, а так як показник заломлення кремнезему дорівнює 1,46 [13], а показник заломлення олійних частинок близький до цієї величини і складає  $1,46\div 1,47$ , то загальний показник заломлення забруднюючого покриття  $n_3=1,46$ ;

4) – забруднюючий шар, що осів на скляну підкладку, є ізотропним середовищем.

Будемо вважати, що на скляну пластинку вихідного вікна нормально падає у прямому напрямку колімований ІЧ-пучок  $(1-\alpha)F_0$  ( $\alpha$  – коефіцієнт втрат в оптичному блоці вузла), який відбивається всередину. При градуюванні ОМАПМД за допомогою фотодіодів датчика ступені забруднення реєструються і до пам'яті пристрою заноситься в кодах АЦП струмовий

еквівалент  $I_{\text{чС}}$  відбитого від чистого вихідного вікна повного променистого потоку. У випадку відбиття потоку від забрудненого зовні вікна фіксується в кодах АЦП струмовий еквівалент  $I_3$  і на основі пропорційної відповідності встановлюється значення коефіцієнта загального відбиття в зворотному напрямку:

$$\rho_{OK} = \rho_{\text{чС}} I_3 / I_{\text{чС}}, \quad (2)$$

де  $\rho_{\text{чС}}$  – коефіцієнт загального відбиття чистого вихідного вікна з використанням скляної пластинки марки К8.

Коефіцієнт  $\rho_{\text{чС}}$  визначимо за відомим співвідношенням для непоглинаючого скла, коли  $\tau_{\text{с}}=1$  [14]:

$$\rho_{\text{чС}} = \frac{2\rho_0}{1+\rho_0}, \quad (3)$$

де  $\rho_0$ , згідно з правилом Гельмгольца, є єдиним коефіцієнтом відбиття для меж розподілу „повітря – скло” та „скло – повітря”, який знаходимо як:

$$\rho_0 = \frac{(n_{\text{С}} - 1)^2}{(n_{\text{С}} + 1)^2}, \quad (4)$$

де  $n_{\text{с}}$  – показник заломлення скляної пластинки вікна, що дорівнює з урахуванням спектральної дисперсії 1,516 на довжині хвилі 850 нм.

Значення коефіцієнтів  $\rho_0$  та  $\rho_{\text{чС}}$  заносяться до пам'яті датчика.

З іншого боку, розгляд схеми всіх складових загального потоку багаторазового відбиття від забрудненого вихідного вікна падаючого колімованого потоку  $(1 - \alpha)F_0$  дозволяє зробити висновок, що основний внесок до загального потоку зворотного відбиття вносять наступні складові у вигляді суми:

$$F_B = (1 - \alpha)F_0 \left[ \rho_0 + (1 - \rho_0)^2 \rho_{\text{СЗ}} + (1 - \rho_0)^2 (1 - \rho_{\text{СЗ}})^2 \rho_{\text{СЗ}} \tau_3^2 \right],$$

де  $\rho_{\text{СЗ}}$  – коефіцієнт відбиття межі розподілу „скло-забруднення”;

$\rho_{\text{ЗВ}}$  – коефіцієнт відбиття межі розподілу „забруднення-повітря”;

$\tau_3$  – коефіцієнт внутрішнього пропускання забруднюючого покриття пилу.

Тоді коефіцієнт загального відбиття вихідного вікна в зворотному напрямку з забруднюючим покриттям дорівнює:

$$\rho_{OK} = \frac{F_B}{(1 - \alpha)F_0} = \rho_0 + (1 - \rho_0)^2 \rho_{\text{СЗ}} + (1 - \rho_0)^2 (1 - \rho_{\text{СЗ}})^2 \rho_{\text{ЗВ}} \tau_3^2, \quad (5)$$

де

$$\rho_{\text{СЗ}} = \frac{(n_3 - n_{\text{С}})^2}{(n_3 + n_{\text{С}})^2}, \quad (6)$$

$$\rho_{\text{ЗВ}} = \frac{(n_3 - 1)^2}{(n_3 + 1)^2}. \quad (7)$$

Звідси знаходимо важливий недостатній параметр:

$$\tau_3 = \sqrt{\frac{\rho_{OK} - \rho_0 - (1 - \rho_0)^2 \rho_{C3}}{(1 - \rho_0)^2 (1 - \rho_{C3})^2 \rho_{3B}}} \quad (8)$$

Сумарний розгляд схеми усіх складових падаючого пучка  $(1-\alpha)F_0$ , які пройшли систему „скляна пластинка – забруднюючий шар”, дозволяє представити загальний променистий колімований потік  $F_K$  на виході забрудненого вікна співвідношенням:

$$F_K = \frac{(1 - \alpha)(1 - \rho_0)(1 - \rho_{C3})(1 - \rho_{3B})\tau_3}{1 - \tau_3^2 \rho_{C3} \rho_{3B}} \cdot (1 + \rho_{C3} \rho_0)F_0.$$

Тоді коефіцієнт загального пропускання вихідного вікна із забруднюючим покриттям дорівнює:

$$\tau_{OK} = \frac{F_K}{(1 - \alpha)F_0} = \frac{(1 - \rho_0)(1 - \rho_{C3})(1 - \rho_{3B})\tau_3}{1 - \tau_3^2 \rho_{C3} \rho_{3B}} \cdot (1 + \rho_{C3} \rho_0). \quad (9)$$

Далі легко визначити ступінь ослаблення  $m$  зонduючого ПЧ-пучка, який обумовлений наявністю на зовнішній поверхні вихідного вікна забруднюючого покриття, приводячи його до коефіцієнта загального пропускання чистої скляної пластинки вікна  $\tau_{чс}$ . Знаходячи за відомим співвідношенням [14]  $\tau_{чс} = (1-\rho_0)/(1+\rho_0)$  та використовуючи (9), отримуємо формулу для визначення ступеня ослаблення:

$$m = \frac{\tau_{OK}}{\tau_{чс}} = \frac{(1 - \rho_0)(1 - \rho_{C3})(1 - \rho_{3B})(1 + \rho_{C3} \rho_0)}{1 - \tau_3^2 \rho_{C3} \rho_{3B}} \cdot \tau_3. \quad (10)$$

За отриманими для визначення  $\rho_{OK}$ ,  $\tau_{OK}$  та  $m$  аналітичними виразами розраховані їхні залежності від коефіцієнта внутрішнього пропускання забруднюючого покриття  $\tau_3$ , які графічно надані на рис.1. Характер поведінки залежностей на рис.1 дозволяє відзначити деякі особливості. По-перше, при зменшенні коефіцієнта внутрішнього пропускання забруднюючого покриття суттєво знижується зареєстрований коефіцієнт загального відбиття  $\rho_{OK}$ , що дозволяє досягти значного розділення при визначенні за допомогою експериментальних даних значення  $\tau_3$ ; по-друге, близькість за величиною показника заломлення скляної пластинки вихідного вікна до показника заломлення пилового забруднення веде до практичної рівності ступеня ослаблення зонduючого ПЧ-пучка на виході вікна та коефіцієнта внутрішнього пропускання забруднюючого покриття; в-третьє, помічене незначне перевищення ступеня ослаблення  $m > 1$  в умовах слабопоглинаючого забруднюючого покриття вказує на деякий прояв ефекту просвітлення.

Визначенням показника  $m$  завершується етап самотестування рівня забруднення у каналі зондування. Разом з тим, оскільки оптичні вікна вузлів ОМАПМД знаходяться в рівних атмосферних умовах, просторово розміщені під одним кутом відносно вертикалі, мають однакові геометричні розміри та виготовлені зі скла однієї марки – К8, припустимо вважати, що ступені ослаблення  $m$  як зонduючого, так і сприймаючого ПЧ-пучків, що проходять крізь відповідно вихідне і вхідне вікно вузлів, тотожно рівні. В такій ситуації загальний ступінь ослаблення променистого ПЧ-потокa розсіяння  $F(\theta)$ , обумовленого пиловим забрудненням обох вікон вузлів датчика, дорівнює  $m^2$ , що можна урахувати програмним шляхом як коефіцієнт корекції забруднення при обробці даних вимірювання. Значення коефіцієнта корекції  $m^2$  заноситься до пам'яті та поновлюється при проведенні наступного планового етапу корекції забруднення.

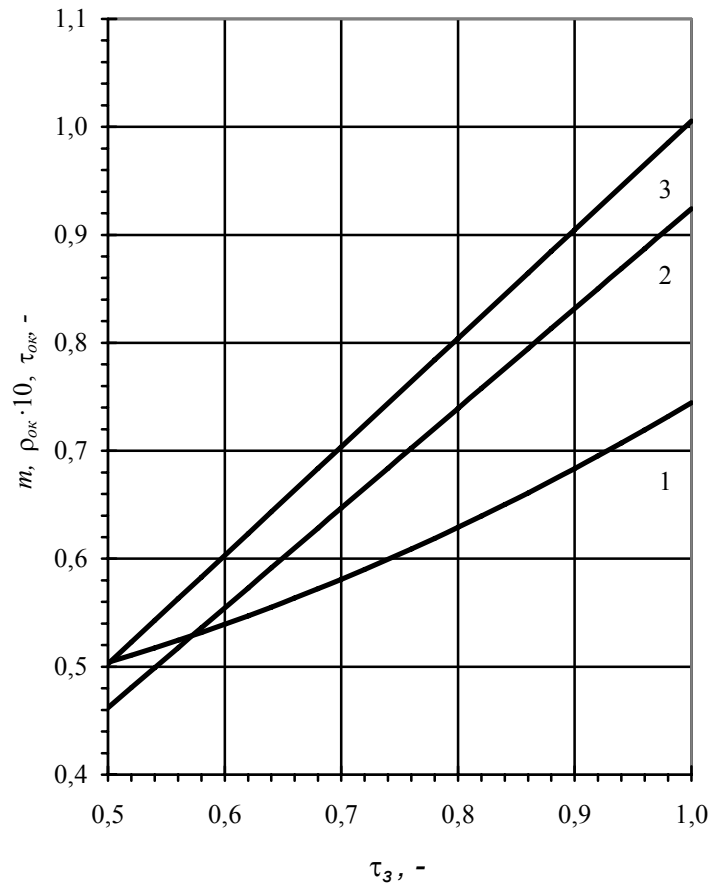


Рис.1. Залежності фотометричних характеристик і ступеня ослаблення зондуемого ІЧ-випромінювання в модельному наданні вихідного вікна із забруднюючим пиловим покриттям від коефіцієнта внутрішнього пропускання покриття: 1 –  $\rho_{ок} = f_1(\tau_3)$ ; 2 –  $\tau_{ок} = f_2(\tau_3)$ ; 3 –  $m = f_3(\tau_3)$ .

Робота програмного забезпечення з автоматичної компенсації впливу забруднення оптичних вікон має окремий самостійний характер і проводиться за рішенням оператора у нічний час доби в умовах прозорі атмосфери з періодичністю, наприклад, 1 раз на місяць, при включеному вузлі ІЧ-випромінювача. У випадку значного забруднення оптичних вікон, коли реєструється  $\tau_3 \leq 0,7$ , на моніторі ПК з'являється повідомлення «ВІКНА ЗАБРУДНЕНІ», і наступні операції датчика блокуються. Розблокування потребує механічного протирання вихідного і вхідного вікон вузлів датчика.

#### 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ОМАПМД

Програмне забезпечення (ПЗ) функціонування ОМАПМД метеорологічної дальності видимості і прозорості атмосфери складається з двох програм – AtmoUtilite і AtmoSoft-2. В цілому, ПЗ призначене для роботи в середовищі Windows 7/10 та має стандартні для цієї операційної системи структуру і засоби управління.

Програма AtmoUtilite виконує первинне градування датчика, тобто здійснює вимір струмового еквіваленту потоку відбиття від чистого від забруднень скла вихідного вікна вузла зондуемого випромінювання  $I_{чс}$  з фіксацією дати вимірювання і передає ці дані в кодах АЦП разом з наданими оператором значеннями показника заломлення  $n_c$  використовуваного для вікон скла та показника заломлення  $n_3$  забруднюючого пилового шару вікна до пам'яті датчика.

Програма AtmoSoft-2 призначена для визначення показника розсіяння ( $\beta$ ), метеорологічної дальності видимості (МДВ) та прозорості атмосфери ( $P$ ) шляхом обробки виміральної інформації датчика.

Алгоритм цієї програми починається з підготовчого етапу – визначення необхідного для виконання автоматичної корекції забруднення оптичних вікон показника  $m$ . Програма зчитує з пристрою значення  $n_C$ ,  $n_3$ ,  $I_{ЧС}$  та дату їхнього виміру, проводить за командою оператора вимірювання струмового еквівалента потоку відбиття  $I_3$  від забрудненого на поточну дату вікна випромінювача, обчислює параметри  $\rho_{OK}$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_{ЧС}$ ,  $\tau_3$ ,  $\rho_{СЗ}$ ,  $\rho_{ЗВ}$ ,  $\tau_{ЧС}$ ,  $\tau_{OK}$  та ступінь ослаблення  $m$  променистого зондуючого ІЧ-пучка, який проходить крізь вихідне вікно із забруднюючим зовнішню поверхню пиловим покриттям, за наведеними вище формулами (2)–(10), відображає їхнє значення у вікні «Корекція забруднень» та заносить отримані результати до пам'яті датчика. Якщо  $\tau_3 \leq 0,7$ , обчислення не виконується, на екран виводиться повідомлення: «Вікна забруднені» (рівень забрудненості вікон вузлів випромінювача та фотоприймача вважається однаковим). В такому випадку слід протерти вікна вузлів датчика і повторити вимір  $I_3$ .

Виконання підготовчого етапу не є обов'язковим для кожного виміру метеопараметрів атмосфери, при його пропусценні ПЗ працює з попередньо одержаним і записаним до пам'яті результатом обчислення  $m$ .

Перш ніж запустити безпосередньо вимірювання, у вікні „Параметри” програми AtmoSoft-2 треба ввести необхідні для проведення обчислювання  $\beta$ , МДВ та  $P$  значення параметрів датчика:

- загальну трасу зондування та візування  $L$ , м;
- калібрувальне значення показника розсіяння  $\beta_K$ , 1/м;
- калібрувальне значення вихідної напруги селективного підсилювача  $U_K$ , В;
- максимальне значення вихідної напруги селективного підсилювача  $U_{\max}$ , В;
- напругу сигналу шум-перешкода  $U_{ШП}$ , мВ;
- час урівноваження фонові завади  $\Delta t_3$ , мс;
- кількість циклів вимірювання  $N$ .

Процесу вимірювання передуює етап урівноваження фонові світлозавади – при вимкненому ІЧ-випромінювачі на фотодіод приймача впродовж часового інтервалу  $\Delta t_3$  діє лише фонове засвічення. Постійний фотострум засвічення, що генерується фотодіодом, перетворюється трансімпедансним перетворювачем (ТІП) в постійну напругу  $U_{ВИХП}$ . Вузол компенсації розпочинає процес урівноваження фотоструму завади так, що в кінці цього етапу досягається величина постійної напруги на виході ТІП  $U_{ВИХП} \leq |0,03|$  В. Часові інтервали роботи датчика обираються мінімальними за значеннями і такими, що забезпечують завершення можливих перехідних процесів в електронних вузлах.

Далі вмикається вузол ІЧ-випромінювача і забезпечується власне режим вимірювання. Програма зчитує значення вихідної напруги датчика  $U_{ВИХ}$  і проводить корекцію впливу забруднень:

$$U_{ВИХ}' = U_{ВИХ} / m^2.$$

Обчислення показника розсіяння атмосфери  $\beta$ , МДВ і прозорості  $P$  виконується наступним чином:

- за умови  $U_{ВИХ}' / U_{\max} \geq 0,1$  для виключення похибки, обумовленої втратами зондуючого і розсіяного випромінювання на загальній трасі  $L$ :

$$\beta = \frac{1}{L} \left[ \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{L\beta_K U_{ВИХ}'}{U_K}} \right],$$



$$\text{МДВ} = 3/\beta;$$

- за умови  $U_{ВИХ}' / U_{\max} < 0,1$ , коли вищезгадана похибка незначна і тому не враховується:

$$\text{МДВ} = \frac{3}{\beta_K} \cdot \frac{U_K - U_{ШП}}{U'_{ВИХ} - U_{ШП}},$$

$$\beta = 3/\text{МДВ}.$$

Далі при вимкненому програмою випромінювачі виконується усереднення  $\beta$  і МДВ для всіх виконаних до цього моменту циклів з відображенням результатів на екрані та обчислення прозорості атмосфери  $P$ :

$$P = \exp(-10^3 \cdot \beta_{CP}),$$

де  $\beta_{CP}$  – усереднене значення  $\beta$ .

Процес вимірювання повторюється  $N$  разів. Завдяки цьому визначається мода отриманого результату, що дозволяє в  $\sqrt{(N-1)}$  разів зменшити похибку вимірювання. Подивитись результати вимірювання без усереднення можна в таблиці, що відкривається за запитом оператора з вікна „Вимірювання”.

Для зручності користування в ПЗ вбудована довідкова система з посторінковим та контекстним розміщенням довідкової інформації.

Загальний вигляд розробленого ОМАПМД метеорологічної дальності видимості та прозорості атмосфери компактного виконання наведено на рис.2. Корпус датчика являє собою металеву збірну П-образну конструкцію з внутрішніми стінками, що розходяться від вертикалі на кут  $20^\circ$  і на які встановлюються назустріч один одному блендами змонтовані світлозахисні оптичні блоки вузлів ІЧ-випромінювача та фотоприймача з вікнами. Корпус датчика виконано атмосферостійким і герметичним з окремим мережним адаптером. Електронні блоки вузлів випромінювача та фотоприймача, а також елементи блока живлення розміщені у горизонтальній перемичці П-образної конструкції.



Рис.2. Загальний вигляд ОМАПМД (без мережного адаптера).

Розроблений і створений макетний зразок ОМАПМД дальності видимості та прозорості атмосфери має наступні техніко-економічні характеристики:

- $k$ -фактор (показник розсіяння)  $(0,17 \div 1,11 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^{-1}$ ;
- метеорологічна дальність видимості  $(18 \div 27 \cdot 10^3) \text{ м}$ ;
- прозорість атмосфери на 1 км шару  $0 \div 0,895$ ;
- стала датчика  $5,93 \text{ м}$ ;
- коефіцієнт пригнічення фонові оптичної завади  $\geq 50 \text{ дБ}$ ;
- потужність споживання  $12 \text{ Вт}$ ;
- габаритні розміри (ДВШ)  $(490 \times 208 \times 78) \text{ мм}$   
(без мережного адаптера та елементів кріплення).

## 5. ВИСНОВКИ

Розроблено та створено макетний зразок мономодульного апаратно-програмного оптоелектронного датчика  $k$ -фактора, метеорологічної дальності видимості і прозорості атмосфери з високими техніко-експлуатаційними характеристиками малогабаритного виконання. Поєднання в алгоритмі функціонування розроблених апаратно-програмних методів реалізації датчика забезпечило підвищення точності та інваріантності результатів вимірювання відносно зовнішнього фонового засвічення і самотестування з автоматичною корекцією впливу забруднення оптичних вікон датчика.

Запропонована методика автоматичної корекції забруднення оптичних вікон або повністю виключає, або значно збільшує часову періодичність проведення операцій їхнього механічного очищення, що скорочує трудовитрати з технічного обслуговування датчика.

Розроблений метеорологічний датчик при серійному виробництві може широко використовуватись як базовий дистанційно керований інструментально-вимірювальний засіб визначення метеопараметрів стану атмосферного середовища для оновлення і переоснащення технологічної бази на державних гідрометеостанціях країни, мобільних пересувних метеостанціях, стаціонарних метеопостах дорожніх- і авіаслужб задля забезпечення гарантованої безпеки праці робітників усіх видів транспорту.

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

### **OPTOELECTRONIC HARDWARE-SOFTWARE MONOMODULAR SENSOR OF METEOROLOGICAL RANGE OF VISIBILITY AND ATMOSPHERE TRANSPARENCY WITH AUTOMATIC CORRECTION OF EXTERNAL POLLUTION EFFECT OF OPTICAL SYSTEMS**

A model sample of a monomodular hardware-software optoelectronic sensor of  $k$ -factor, meteorological range of visibility and atmosphere transparency with high technical and operational characteristics of small-sized execution is developed and created. The combination in the algorithm of functioning of the developed hardware-software methods of sensor creation provided increase of accuracy and invariance of results of measurement concerning external background illumination and self-testing with automatic correction of pollution effect of optical windows of the sensor. Continuous monitoring of the degree of contamination of optical windows provides an opportunity in case of detection of exceeding the permissible level of pollution to provide the operator with information about the need for preventive work. The proposed method of automatic correction of contamination of optical windows either completely eliminates or significantly increases the time interval of their mechanical cleaning operations, which reduces labour costs for maintenance of the sensor. The analysis of technical capabilities of the nodes of the model sample of the sensor allowed to estimate its basic meteorological parameters: the  $k$ -factor –  $(0,17 \div 1,11 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^{-1}$ , the meteorological visibility –  $(18 \div 27 \cdot 10^3) \text{ м}$  and the atmosphere transparency per 1 km of the layer –  $(0 \div 0,895)$ . The developed meteorological sensor can be used as a basic remote-controlled instrument for measuring meteorological parameters of the state of the atmosphere at the hydrometeorological stations of the country, mobile meteorological stations, stationary meteorological stations of road and air services to ensure guaranteed safety of workers.

**Keywords:** optoelectronic sensor, meteorological range of visibility, atmospheric transparency, scattering index, nephelometer.

1. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. Ленинград: Гидрометеоздат. 1988. 216 с.
2. Аднашкин В.Н. Погрешность фотометров рассеянного света (ФРС), обусловленная ослаблением света. *Труды ГГО*. 1979. Вып. 433. С.58-61.
3. Баранов А.М. Видимость в атмосфере и безопасность полетов. Ленинград: Гидрометеоздат. 1991. 206 с.
4. Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова Б.А. Экспериментальное исследование оптических свойств приземного слоя атмосферы. *Труды ГГО*. 1967. Вып. 220. С.101-162.
5. Хьюлст Г. Ван де. Рассеяние света малыми частицами. Москва: Изд-во иностр. лит. 1961. 536 с.
6. Розенберг Г.В. Электродинамика статически неоднородных сред и теория переноса. *Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света*. Минск. 1971. С.159-170.
7. Кретуліс В.С., Мінакова І.Є., Олексенко П.Ф. Оптоелектронний датчик метеорологічної дальності видимості. *Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка*. 2013. Вып. 48. С. 105-112.
8. Кретуліс В.С., Мінакова І.Є., Олексенко П.Ф. Оптоелектронний базовий модуль сенсорних систем метеорологічного та екологічного моніторингу. *Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка*. 2016. Вып. 51. С. 113-118.
9. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли: пыли, дымы и туманы. Москва: Мир. 1972. 428 с.
10. Гончарук В.В., Лапшин В.Б., Чичаева М.А., Сыроежкин А.В. Атмосфера как коллоидная система. *Химия и технология воды*. 2011. **33**. № 6. С. 571-600.
11. Zhao H., Yin C., Chen M., Wang W. Risk assessment of heavy metals in street dust particles to a stream network. *Soil Sedim. Contam.* 2009. **18**. P. 173-183.
12. Международный стандарт ГОСТ EN410-2014. Стекло и изделия из него. Методы определения оптических характеристик. Определение световых и солнечных характеристик (EN410.2011.IDT). Москва: Стандартиформ. 2016. 41 с.
13. Бобкова Н.М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. Минск: Выш. шк. 2007. 301 с.
14. Гуревич М.М. Фотометрия. Теория, методы и приборы. Ленинград: Энергоатомиздат. 1983. 272 с.

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

Отримано 07.09.2021