

В.С. Кретуліс, І.Є. Мінакова, П.Ф. Олексенко, В.М. Сорокін

ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ НЕФЕЛОМЕТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ МЕТЕОПАРАМЕТРІВ АТМОСФЕРНОГО СЕРЕДОВИЩА

Предметом виконання даної роботи є розроблення та створення оптоелектронного приладно-вимірювального інструменту визначення метеопараметрів (показника розсіяння (k -фактору), метеорологічної дальності видимості та прозорості атмосфери) стану водних аерозолів [1] в приземному шарі навколишнього атмосферного середовища, котрий дозволяє в автоматизованому процесі функціонування отримувати достовірні дані у широкому динамічному діапазоні дальності видимості. У розробленому оптоелектронному вимірювачі метеопараметрів знайшли технічне вирішення питання забезпечення завадозахищеності від зовнішнього фонового випромінювання та зменшення похибки вимірювань. Оптоелектронний вимірювач метеопараметрів побудовано на основі виконаної раніше авторами розробки оптоелектронного датчика метеорологічної дальності видимості, яка базувалась на концепції нефелометричного метода прямого розсіяння зондуючого випромінювання в досліджуваному атмосферному середовищі [2]. Алгоритмічно робота вимірювача проводиться в автоматичному режимі за циклами, в кожному з яких із заданими часовими інтервалами виконується компенсація фонові завади за принципом Понселе, вимірювання інформаційного сигналу і визначення метеопараметрів з виключенням методичної похибки, викликані урахуванням втрат вимірювання по траєкторії візування, що досягає значень $\sim 20\%$. В цілому розроблений автоматизований оптоелектронний нефелометричний вимірювач відрізняється високими технічними характеристиками (метеорологічна дальність видимості 15 м – 48 км) та експлуатаційною можливістю дистанційного керування.

Ключові слова: оптоелектронний нефелометричний вимірювач метеопараметрів, метеорологічна дальність видимості, показник розсіяння, прозорість атмосфери, компенсація фонові завади.

1. ВСТУП

Відомо, що у більшості випадків погіршення стану погодних метеоумов у навколишньому атмосферному середовищі пов'язано з проявленням і наявністю таких водних полідисперсних систем як щільний серпанок, туман, дощ та сніг [1]. Дія водних аерозольних систем викликає ослаблення видимого випромінювання (світла) в атмосферному середовищі за рахунок ефекту розсіяння при практичній відсутності ефекту поглинання. При цьому стан атмосферного середовища прийнято характеризувати такими основними метеопараметрами (метеоелементами), як показник розсіяння (k -фактор), метеорологічна дальність видимості та прозорість. У зоровому сприйнятті матеріального світу людиною сукупність метеопараметрів зводиться до оцінки дальності видимості, що має велике практичне значення у багатьох аспектах людської діяльності. Насамперед, це надзвичайно важливо для дорожніх служб, для автомобільного, водного і повітряного транспорту, оскільки сприяє організації їх безпечної роботи. Моніторинг дальності видимості та фізичного стану приземного шару атмосфери здійснюється по широкій мережі метеостанцій та метеопостів з використанням приладно-інструментального парку (прилади серій РДВ і ФІ) з недостатньо високими техніко-експлуатаційними характеристиками.

Предметом постановки задачі та виконання даної роботи є розробка та створення оптоелектронного приладно-вимірювального засобу визначення метеопараметрів стану водних аерозольних систем у приземному шарі атмосферного середовища, який дозволяє в автоматизованому процесі вимірювання із заданим у діалозі оператора і персонального комп'ютера алгоритмом функціонування отримувати достовірні дані в широкому динамічному діапазоні значень дальності видимості. При цьому в розробленому оптоелектронному вимірювачі метеопараметрів знаходять технічне рішення питання забезпечення завадозахищеності від зовнішнього фонового засвічення та зменшення похибки вимірювання.

2. ПОБУДОВА ВИМІРЮВАЧА МЕТЕОПАРАМЕТРІВ

Прикладною основою побудови оптоелектронного вимірювача метеопараметрів (ОЕВМП) є проведена раніше авторами розробка оптоелектронного сенсора (датчика) метеорологічної дальності видимості, яка базувалась на концепції нефелометричного методу з використанням ефекту спрямованого прямого розсіяння зондуючого випромінювання в досліджуваному атмосферному середовищі [2]. Побудовані за нефелометричним методом вимірювачі метеопараметрів, хоча і є локальними та екстраполяційними, мають широке розповсюдження в практиці моніторингу атмосфери в силу своїх переваг, таких як абсолютна нечутливість до поглинання світла (випромінювання), великий діапазон (до п'яти порядків) значень метеопараметрів, що вимірюються, безбазовість (моностатичність), що вигідно відокремлює їх від базових фотометрів, компактність, простота конструкції та незначна вага, що дозволяє використовувати їх як стаціонарні та мобільні інструменти моніторингу та дослідження прозорості атмосфери.

Оптична схема нефелометричного вимірювача, як і реалізованого в роботі [2] сенсора, містить модуль зондуючого випромінювання, розташований під кутом розсіяння до нього модуль фотоприймача, оптична взаємодія пучків яких формує відкритий для вимірювань чутливий об'єм V випромінювання, що розсіюється, та який у даному випадку не зазнає обмежень через наявність механічних деталей. Розсіяний чутливим об'ємом потік випромінювання F_p відповідно до загальноприйнятого нефелометричного рівняння виявляється лінійно пропорційним розміру чутливого об'єму V , величині зондуючого потоку F_0 та показнику розсіяння β_δ атмосферного середовища [3]:

$$F_p = k_{oc} F_0 V \beta_\delta, \quad (1)$$

де k_{oc} – геометричний фактор конструкції оптичної системи.

Прийнятий фотоприймальним модулем у «чистому» вигляді без зовнішніх завад потік розсіяння перетворюється у вихідний інформаційний сигнал у формі змінної напруги і за його реєстрованої величини оператором обчислюється значення потрібних метеопараметрів. У реальних робочих умовах на оптичний вхід організованого з використанням кремнієвого фотодіода фотоприймального модуля нефелометричного вимірювача додатково потрапляє паразитне фонове засвічення (завада), яке за рівнем світлового потоку виявляється незмірно значнішим, ніж потік розсіяння чутливого об'єму вимірювача, та яке практично виводить його з робочого стану, переводячи до режиму нелінійності вхідний високочутливий трансімпедансний підсилювач модуля.

До фонових завад від сторонніх джерел в атмосферному середовищі будемо відносити ті, які існують незалежно від наявності потоку розсіяння в чутливому об'ємі. За своїм походженням джерелами фонові завади можуть бути природні та штучні технічні випромінювачі [4], серед яких найбільш потужним є Сонце та продукти його оптичної взаємодії з землею поверхнею та атмосферою. Присутнє пряме сонячне випромінювання завдяки таким конструкційним виконанням, як бленда, попередній нахил фотоприймального модуля до земною поверхні, в значній мірі виключається з джерел фонові завади нефелометричного вимірювача.

Найбільш суттєвим за своїм рівнем є відбите і розсіяне сонячне випромінювання. Часткове усунення такого роду фонові завади у видимій області спектра досягається використанням щільного червоного світлофільтра КС18, як було запропоновано у [2]. Проте в ближньому інфрачервоному (ІЧ) спектральному діапазоні сонячного випромінювання захист від переважної ролі фонові завади не знайшов свого технічного рішення та реалізації.

Відповідно до запропонованої в даній роботі методики алгоритм функціонування ОЕВМП з виконання процесу вимірювання з пригнічуванням фонові завади містить рознесені

у часі три етапи (підготовчий етап роботи вимірювача із задання температурних режимів модулів тут опускається). На першому етапі – етапі компенсації фонові завади за принципом Понселе [5] – модуль зондуючого випромінювання вимикається, а фотоприймальний модуль знаходиться у робочому стані, і на його робочий фотодіод ФДР впливає виключно квазістаціонарна фонові завада $F_{\phi 3}$ (рис. 1а). Постійний фотострум короткого замикання $I_{\phi 3}$, що генерується фотодіодом ФДР згідно з рівнянням $I_{\phi 3} = S_i F_{\phi 3}$, де S_i – струмова чутливість ФДР, лінійно перетворюється трансімпедансним підсилювачем ТІП до вихідної напруги $U_{\phi 3}$ з коефіцієнтом перетворення R_{ϕ} :

$$U_{\phi 3} = R_{\phi} I_{\phi 3} = R_{\phi} S_i F_{\phi 3}. \quad (2)$$

Виміряна ВПЕ фонові завада у формі $U_{\phi 3}$ реєструється запам'ятовуючим пристроєм ЗП. Наступним кроком даного етапу запам'ятовуючий пристрій перепідключається до створеного каналу компенсації, до складу якого входить кероване напругою джерело струму ДСКН та діодний оптрон О (рис. 1б). Діодний оптрон сконструйований з використанням кремнієвого фотодіода S2687-66R і має цілковито ідентичні оптичні параметри, включаючи наднизьку щільність завад, з робочим фотодіодом S2386-8K фірми Hamamatsu.

Вихідний струм I_{ϕ} , що виробляється ДСКН відповідно до залежності $I_{\phi} = G U_{\phi 3}$, де G – крутизна перетворення ДСКН, викликає ІЧ випромінювання світлодіода оптрона О і завдяки прямому оптичному зв'язку веде до генерації струму короткого замикання I_{κ} фотодіодом ФДО оптрона з коефіцієнтом передачі за струмом оптрона K_i , тобто

$$I_{\kappa} = K_i I_{\phi} = G K_i U_{\phi 3}. \quad (3)$$

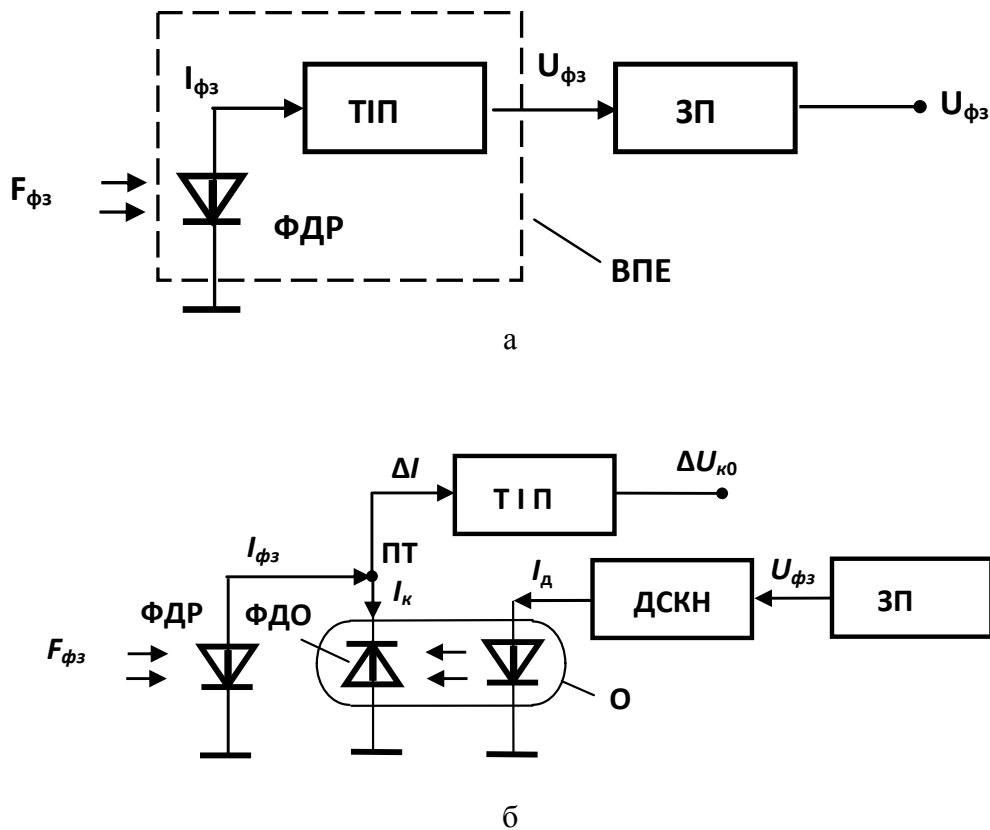


Рис. 1. Компенсація фонові завади: а) вимірювання фонові завади (ВПЕ – вимірювально-перетворювальний елемент), б) структурна схема компенсації.

Робочий фотодіод ФДР, як вимірювальний елемент фонові завади, і фотодіод оптрона ФДО, як елемент компенсаційного каналу, що врівноважує, підключаються до підсумовуючої точки ПТ, яка є інвертуючим входом ТПП. При цьому фотодіод оптрона ФДО підключений до ПТ за схемою струмовідводу та компенсує струмом I_k струм фонові завади I_{ϕ_3} , в результаті чого вхідний струм ТПП дорівнює

$$\Delta I = I_{\phi_3} - I_k. \quad (4)$$

У статичному режимі фонові завади при безінерційності та лінійності елементів системи компенсації з урахуванням вищенаведених співвідношень (2)-(4) маємо

$$\Delta I = S_i F_{\phi_3} - K_i G R_{\phi} S_i F_{\phi_3}.$$

Тоді показник ступеня компенсації визначиться як

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I_{\phi_3}} = 1 - K_i G R_{\phi}. \quad (5)$$

Згідно з (5) умовою повної компенсації буде виконання рівності $K_i G R_{\phi} = 1$.

У нашому конкретному вимірювачі, коли $K_i = 0,08$ та $R_{\phi} = 10^7$ Ом, для досягнення повної компенсації фонові завади необхідно, щоб потрібна крутизна перетворення ДСКН становила

$$G = \frac{1}{K_i R_{\phi}} = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ СМ}.$$

Проте реалізувати ідеально повну компенсацію практично неможливо через температурні дрейфи параметрів K_i та G і умовної квазістаціонарності фонові завади, тому слід вважати прийнятним результатом, коли залишкова вихідна постійна напруга компенсатора $\Delta U_{\kappa 0} \neq 0$ і сягає десятків мілівольт. Таким чином, ОЕВМП виявляється захищеним від зовнішніх фонових завад.

На другому етапі роботи ОЕВМП – етапі вимірювання – до виходу ТПП у фотоприймальному модулі підключаються селективні підсилювачі [2], модуль зондуючого випромінювання переводиться до робочого стану, і на робочий фотодіод фотоприймального модуля впливають і фонові завади, і інформаційний потік розсіяння F_p . Фотоприймальний модуль виконує лінійне фотометричне перетворення потоку розсіяння F_p у вихідний інформаційний сигнал у формі змінної напруги діючого значення $U_{вих}$, починаючи з порогового рівня $U_{\min}/U_{шз} \approx 6$ (тут U_{\min} – мінімальне значення вихідної напруги $U_{вих}$, а $U_{шз}$ – середньоквадратичне значення вихідної напруги за $F_p = 0$, що зумовлено наявністю шумів і завад у вимірювальному тракті модуля), тобто

$$U_{вих} = F_0 k_{oc} V S_i R_{\phi} K_{cn} \beta_{\phi} + U_{шз}, \quad (6)$$

де K_{cn} – загальний коефіцієнт підсилення каскадно з'єднаних селективних підсилювачів (фільтрів) фотоприймального модуля.

Наступним кроком вихідна напруга $U_{вих}$ як інформаційний аналог потоку розсіяння (без $U_{шз}$) реєструється та заноситься до пам'яті ПК. По завершенні другого етапу джерело зондуючого випромінювання в модулі випромінювача вимикається.

3. ПРОГРАМА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТЕОПАРАМЕТРІВ

Зміст третього етапу одного робочого циклу ОЕВМП становить визначення з урахуванням втрат по траєкторії візування скоректованого показника розсіяння атмосферного середовища β і скоректованої метеорологічної дальності видимості S_M . Етап проводиться в автоматизованому режимі з використанням програмного забезпечення ПК шляхом обробки виміральної інформації другого етапу за співвідношеннями, отриманими в роботі [6]. Програма виконує керування процесами трьох етапів роботи з візуалізацією результатів.

Функціонально модуль зондуючого випромінювання та фотоприймальний модуль підключаються до ПК, який знаходиться під управлінням операційної системи Windows, через два малогабаритних блоки перетворення інтерфейсів USB/RS-485 з гальванічною розв'язкою Triton 5010i зі швидкістю передачі даних 0,25 Мбіт/с. Для роботи блоків проведено установку драйверів VCP (Virtual Com Port), що дозволяє працювати з USB-каналом як з додатковим COM-портом ПК за допомогою стандартних Windows WCOMM API. Для зручності користувача блоки забезпечені світлодіодною індикацією режимів включення і прийому-передачі даних.

Розроблена програма має стандартну структуру і засоби керування, прийняті в операційній системі Windows. Після запуску оператор задає робочі режими модуля зондуючого випромінювання (температуру та струм ІЧ випромінювача) і фотоприймального модуля (температуру) та вводить параметри вимірювання і обчислення:

- L – траєкторія візування, [м];
- β_K , U_K – калібрувальні значення показника розсіяння [1/м] і вихідної напруги селективних підсилювачів [В] відповідно до [2];
- U_{max} – максимальне значення вихідної напруги селективного підсилювача, [В];
- $U_{шз}$ – середньоквадратичне значення напруги шум-завади, [мВ];
- Δt_1 – інтервал часу на виконання етапу компенсації фонові завади, [мс];
- Δt_2 – інтервал часу на встановлення температурного режиму роботи модулів, [мс];
- N – кількість циклів, кожен з яких містить три вищезазвані етапи.

Наступним кроком виконується обчислення скоректованих значень показника розсіяння атмосфери β і метеорологічної дальності видимості S_M відповідно до співвідношення:

$$\beta = \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - L \cdot \beta_K \cdot \frac{U_{вих} - U_{шз}}{U_K - U_{шз}}} \right),$$

$$S_M = 3/\beta.$$

Проаналізуємо поведінку відносної похибки на прикладі визначення S_M з урахуванням втрат випромінювання по траєкторії візування ОЕВМП. Грунтуючись на результатах роботи [6], легко довести, що вираз для визначення відносної похибки S_M має вигляд

$$\varepsilon_M = \frac{S_{M6} - S_M}{S_M} = \left| \exp \left[\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - L \cdot \beta_K \cdot \frac{U_{вих} - U_{шз}}{U_K - U_{шз}}} \right] - 1 \right|, \quad (7)$$

де S_{M6} – значення метеорологічної дальності видимості без урахування втрат по траєкторії візування.

За цією формулою (7) проведено розрахунок поведінки відносної похибки ε_M у залежності від значення метеорологічної дальності видимості S_{M6} , яку графічно наведено на рис. 2.

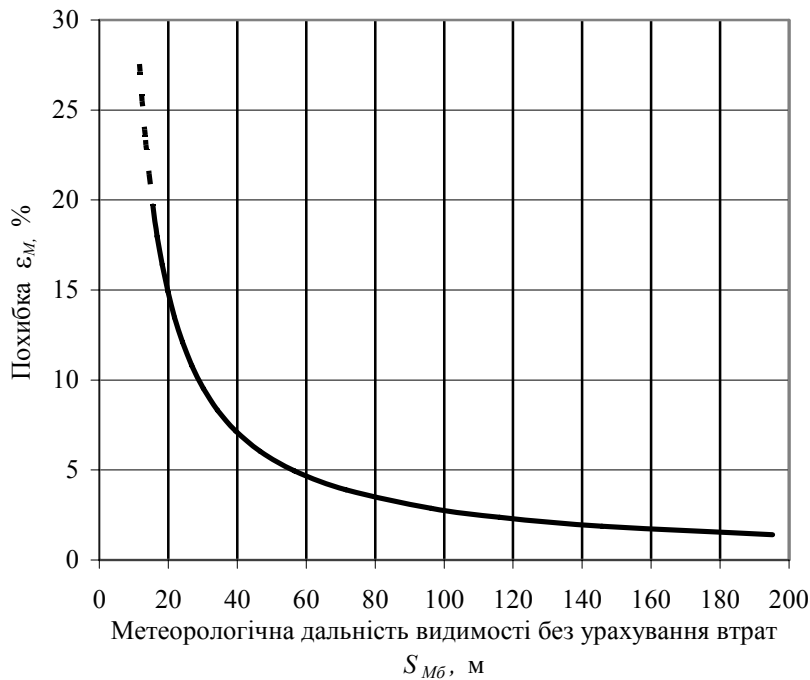


Рис. 2. Похибка визначення метеорологічної дальності видимості через втрати на розсіяння по траєкторії візування ($L = 0,91$ м).

Згідно з рис. 2 слід відзначити спадний монотонний характер залежності при зростанні S_{M6} , котру як методичну похибку можна виключити повністю при визначенні метеорологічної дальності видимості більшої за 500 м. Разом з тим ϵ_M виявляється значною і при метеорологічній дальності видимості близько 15 м вона вже становить $\approx 20\%$. Позначення на залежності (рис. 2) пунктиром відповідає її приблизній поведінці, оскільки добуток βL стає близьким до гранично допустимого значення $\beta L \leq 0,23$, прийнятого в [6] при розрахунках метеопараметрів.

Третій етап циклу визначення метеопараметрів завершується обнуленням запам'ятовуючих пристроїв інформації стосовно компенсації та вимірювання.

Результати виводяться як у вигляді таблиці зі значеннями β і S_M для кожного циклу вимірювання, так і усереднених за всіма завершеними без помилок циклами середніми значеннями. Хід виконання вимірювань супроводжується інформацією про поточну стадію процесу (компенсація фонові завади, встановлення температурного режиму модулів, очікування наступного циклу) та ступенів її виконання у процентах для поточного циклу та всього вимірювання у вигляді кольорових індикаторів (смуг). Також фіксується виміряне значення $U_{вих}$, а після закінчення процесу – кількість успішно завершених циклів.

Якщо під час будь-якого циклу трапляється помилка, то повідомлення про це з'являється в статус-рядку, під час усереднення цей цикл не враховується, вимірювання не припиняється, програма в звичайному режимі продовжує роботу. По завершенні вимірювання зведена інформація про виниклі помилки, якщо вони були, виводиться в статус-рядку. Для зручності використання у програму вбудована довідкова система, вікно довідки містить виокремлені кольором і підкресленням терміни, про які можна отримати додаткову інформацію.

Нижче наведено основні технічні характеристики ОЕВМП:

Показник розсіяння (k -фактор)	$0,2 \div 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}$
Динамічний діапазон визначення метеорологічної дальності видимості	$15 \text{ м} \div 48 \text{ км}$
Максимальне значення вихідного інформаційного сигналу U_{max}	10 В
Калібрувальні значення:	
показника розсіяння β_k	$6,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$
вихідного інформаційного сигналу U_k	0,317 В
Середньоквадратичне значення напруги шум/завада $U_{\text{шз}}$	0,62 мВ
Часовий інтервал компенсації фонові завади Δt_1	5 с

4. ВИСНОВКИ

Розроблено та створено програмно керований з ПК оптоелектронний нефелометричний вимірювач метеопараметрів водних атмосферних аерозолів, до яких віднесені показник розсіяння (k -фактор) і метеорологічна дальність видимості. Алгоритмічно робота вимірювача проводиться за циклами, в кожному з яких за заданими часовими інтервалами виконується пригнічення фонові завади, вимірювання інформаційного сигналу і визначення метеопараметрів. Пригнічення (шляхом компенсації) фонові завади реалізовано за запропонованою методикою з використанням зрівноважувального діодного оптрона, що дозволило усунути можливі перевантажувальні нелінійності вимірювального тракту та відповідні похибки вимірювань. Визначення метеопараметрів в ОЕВМП проводяться за скоректованими співвідношеннями з виключенням методичної похибки, викликані ураженням втрат випромінювання по траєкторії візування, яка досягає значень $\approx 20\%$. В цілому, розроблений ОЕВМП відрізняється високими технічними характеристиками і експлуатаційною можливістю дистанційного керування.

V.S. Kretulis, I.E. Minakova, P.F. Oleksenko, V.M. Sorokin

OPTOELECTRONIC NEFLOMETRIC METER OF THE ATMOSPHERIC ENVIRONMENT METEOPARAMETERS

The subject of this work was to develop and create an optoelectronic instrumental measuring tool for determination of meteorological parameters (coefficient of extinction (k -factor), meteorological range of visibility and transparency of atmosphere), of the state of water aerosols in the surface layer of ambient atmosphere, which allows one to obtain reliable data in a wide dynamic range of visibility for the automated operation. In the developed optoelectronic meter of meteorological parameters, the technical solution to the problem of ensuring noise immunity to external background radiation and reducing the measurement error has been found. Optoelectronic meter of meteorological parameters was constructed on the basis of the development of the optoelectronic sensor for the meteorological range of visibility previously developed by the authors, which was based on the concept of nephelometric method of direct scattering probe radiation in the investigated atmospheric environment. Algorithmically, operation of the meter is carried out in the automatic mode by cycles, each of which with the predefined time intervals compensates the background noise by using the Poncelet principle, measurement of the information signal and determination of the meteorological parameters with the exception of the methodological error caused by taking into account the losses along the line of vision, which reach values close to 20 %. In general, an automated optoelectronic nephelometric meter is characterized by high technical performances (meteorological range of visibility 15 m...48 km) and the operational capability of remote control.

Keywords: optoelectronic nephelometric meter of meteorological parameters, meteorological range of visibility, extinction coefficient, atmospheric transparency, compensation of background noise.

1. Ковалев В.А. *Видимость в атмосфере и ее определение*. Л.: Гидрометеиздат, 1988.
2. Кретулiс В.С., Мiнакова I.Є., Олексенко П.Ф. Оптиелектронний датчик метеорологiчної дальностi видимостi. *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*. 2013. Вып. 48. С. 105–112.
3. Баранов А.М. *Видимость в атмосфере и безопасность полетов*. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
4. Павлов А.В. *Оптико-электронные приборы (Основы теории и расчета)*. М.: Энергия, 1974.
5. Воронов А.А. *Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем*. М.: Энергия, 1980.
6. Кретулiс В.С., Мiнакова I.Є., Олексенко П.Ф. Оптиелектронний базовий модуль сенсорних систем метеорологiчного та екологiчного монiторингу. *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*. 2016. Вып. 51. С. 113–118.

Институт фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
41, проспект Науки, 03028 Київ

Отримано 30.10.2018 р.