

© 2008р. В.К. Бутенко, І.В. Докторович, В.М. Годованюк, В.Г. Юр'єв,
В.Г.Житарюк *

ВАТ "ЦКБ Ритм", Чернівці

*Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці

ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ФОТОПРИЙМАЧІВ

На підставі стандартів здійснено аналіз методик та техніки вимірювання інтегральної чутливості фотоприймачів оптичного випромінювання від виробника. Запропонована методика вимірювань в ультрафіолетовому спектральному діапазоні як прерогатива авторів, оскільки інформація в нормативних документах має лише рекомендаційний характер. Особливого розгляду підлягають чинники, які визначають точність вимірювань.

The analysis of procedures and techniques of integral sensitivity measuring for industrial optical radiation photodetectors have been carried out on the basis of primary standards. The measuring procedure in ultra-violet spectral range has been proposed as prerogative of authors so far as information in normative documents has only voluntary character. The special attention is paid to effects that specify measuring precision.

Вступ

Сьогодні метрологія інтегральної чутливості фотоприймачів (ФП) не забезпечена єдиною нормативною документацією. Головним критерієм є спектральний склад джерела випромінювання. Стандарт, який визначає методи вимірювання фотоелектричних параметрів ФП, установлює, що тип джерела випромінювання повинен регламентуватися вимогами технічних умов на конкретний тип приймача [1; 2]. Так, для ФП, чутливих у видимій та інфрачервоній областях спектра, рекомендується вибирати як джерело абсолютно чорні тіла (АЧТ) з температурою порожнини $T=(500\pm 2)$ К або $T=(1273\pm 15)$ К. Для ФП, чутливих у видимій і ближній інфрачервоній областях, рекомендується вибирати як джерело лампи розжарювання типу СІС або РН при кольоровій температурі $T_k=2856$ К.

Практично відсутні нормативні рекомендації щодо вимірювань в ультрафіолетовій області спектра, тому цей аспект метрології параметрів ФП особливо актуальний.

У даній праці проаналізовані методики вимірювання інтегральної чутливості фотоприймачів у широкому спектральному діапазоні, які використовуються при атестації на виробництві. Це дозволить, при потребі, в межах похибки відтворити споживачем умови й режими вимірювання параметрів ФП.

Атестація фотоприймачів інфрачервоної (ІЧ) області спектра

Розглянемо методику вимірювання інтегральної чутливості фотоприймачів, чутливих у середній і дальній ІЧ-області. Такі ФП практично нечутливі до оптичного випромінювання ламп розжарювання, що зумовлено обмеженнями довгохвильового краю пропускання $\lambda \leq 2,5$ мкм скляних колб ламп.

Структурна схема установки для вимірювання інтегральної чутливості ФП наведена на рис. 1. Як джерело 1 використано абсолютно чорне тіло. На практиці користуються моделлю АЧТ з коефіцієнтом випромінювання, який близький до одиниці (не менше 0,98). Тобто в подальшому під АЧТ маємо на увазі "сірі випромінювачі". Зараз створено велику кількість конструкцій АЧТ, які відрізняються своїми технічними й метрологічними характеристиками.

В Україні переважно використовуються АЧТ під шифром К19.532 з блоком регулювання температури К15.742, а також К21.532 з блоком К22.742. За будовою вказані конструкції є окремими блоками й можуть використовуватися при дослідженні параметрів ІЧ-фотоприймачів довільного типу. Так, для ФП, які охолоджуються зрідженими газами, конструкція АЧТ кріпиться вертикально за напрямом випромінювання "зверху-вниз" або "знизу-вверх"; для інших ФП - горизонтально. Згадані джерела випромінювання

забезпечують дослідження інтегральної чутливості в широкому спектральному діапазоні завдяки змінам температури порожнини АЧТ від 50 до 1000 °С. При цьому можна змінювати потік випромінювання від порогового значення $\Phi_{\text{п}}$ до $10^4 \cdot \Phi_{\text{п}}$, частоту модуляції від 20 Гц до 100 кГц, температурний діапазон від -60 до 80°С. Для досліджень частотних параметрів ФП використовується механічний модулятор АДБ7.0089 з блоком живлення Б5-45. Зміна частоти забезпечується зміною напруги живлення електродвигуна і заміною диска модулятора. У схемі використані селективний підсилювач У2-8 (У2-6), вольтметр В3-38.

Основні параметри установок для вимірювання інтегральної чутливості ФП в ІЧ-області спектра зведені в таблицю 1.

Таблиця 1. Основні параметри установок для вимірювання інтегральної чутливості фотоприймачів

Параметри установок	Тип установки (вимірювальної схеми)	
	Установка К54.410	Схема з АЧТ К19.532 (К21.532)
Температура порожнини АЧТ, °С	від $T_{\text{min}}=50$ до $T_{\text{max}}=1000$	
Розмір змінних діафрагмах, мм	0,6; 1,2; 2,4; 4,8; 8	0,3; 0,6; 1,2; 2,4; 4,8; 8
Енергетична освітленість фоточутливого елемента з виконанням вимог точковості джерела, Вт/м ²	від 10^{-4} до 2,5	від 10^{-6} до 10^2
Частота модуляції потоку випромінювання ($f_{\text{мод}}$)	400; 800; 1200 Гц	від 20 Гц до 100 кГц
Резонансна частота попереднього підсилювача ($f_{\text{рез}}$)	400; 800; 1200 Гц	від 20 Гц до 100 кГц
Еквівалентна смуга пропускання попереднього підсилювача, % від $f_{\text{рез}}$	8–10	4–6
Напруга шуму при $R_{\text{н}}=50$ кОм, мкВ	не більше 0,7	не більше 0,1
Нестабільність попереднього підсилювача за 8 год, %	не більше 2,0	не більше 2,0
Опір резисторів навантаження у колі ФП, кОм	від 50 до 1750	від 50 до 1750
Похибка вимірювання напруги сигналу, %	не більше ± 3	не більше ± 3
Напруга живлення U , В	до 100	до 100
Відстань між АЧТ і чутливим елементом, мм	300	від 50 до 3000

Примітка. Для атестації серійних ФП використовується установка К54.410.

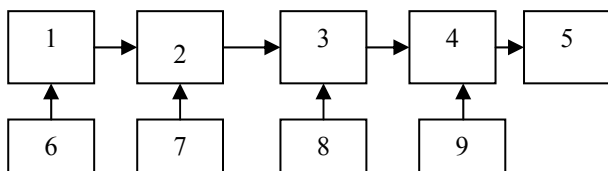


Рис. 1. Структурна схема установки для вимірювання фотоелектричних параметрів ФП: джерело випромінювання – АЧТ з температурою порожнини 500 або 1273 К (1), механічний модулятор (2), вимірюваний ФП в контактному пристрої (3), передпідсилювач (4), вольтметр (5), блок регулювання температури АЧТ (6), блок регулювання та стабілізації частоти модуляції потоку випромінювання (7), блок живлення ФП (8), блок живлення передпідсилювача (9). Примітка: (3) не входить до складу установки К54.410

При визначенні інтегральної чутливості на виробництві для спрощення вимірювання широко використовується метод порівняння параметрів вимірюваних фотоприймачів із параметрами однотипного, каліброваного як контрольного (еталонного) ФП за умови, що його спектральна характеристика тотожна досліджуваному.

Нехай виконані вимірювання за однаковими умовами й режимами контрольним ($U_{\text{к}}$) та випробовуваним ($U_{\text{в}}$) ФП. Тоді чутливість останнього ($S_{\text{в}}$) ФП визначається за співвідношенням

$$S_{\text{в}} = S_{\text{к}} \frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{к}}}, \quad (1)$$

де $S_{\text{к}}$ - чутливість контрольного ФП.

Проте чутливість ФП суттєво залежить від температури оточуючого середовища, напруги живлення ФП, зміни спектрального складу потоку випромінювання, погіршення чутливості ФП з часом експлуатації (старіння) тощо. Тому на практиці для вимірювання чутливості використовується аналітичний метод – при відомих температурі та розмірах вихідної діафрагми АЧТ розраховується потік випромінювання (Φ) або енергетична освітленість ($E_{\text{е}}$), яку він створює. Енергетична освітленість ФП розраховується за відомими у фотометрії співвідношеннями за умови точковості джерела $L \geq (5 \div 10)d$, де L - відстань між діафрагмою, діаметром d , джерела випромінювання й фоточутливим елементом ФП. При

цьому кутовий розподіл випромінювання АЧТ має відповідати закону Ламберта. Для АЧТ різної конструкції розподіл випромінювання відповідає закону Ламберта в межах кутів 5–10°. Конструктивно в установці К54.410 створені умови точковості джерела. При максимальному розмірі діафрагми ($d_{\max}=8$ мм) точковість забезпечується на відстані $L\approx 300$ мм між діафрагмою і фоточутливим елементом. Відповідність розподілу випромінювання АЧТ закону Ламберта при $L=300$ мм спостерігається, якщо діаметр світлової плями не перевищує 50 мм.

При дотриманні умов точковості джерела енергетична освітленість визначається так:

$$E_e = \frac{\sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot A}{\pi \cdot L^2}, \quad (2)$$

де E_e – енергетична освітленість (Вт/см²), σ – постійна Стефана–Больцмана (Вт·см²К⁻⁴), T^0 та T – температура порожнини АЧТ та модулятора (К), A – площа отвору діафрагми АЧТ (см²), L – відстань між діафрагмою АЧТ і чутливим елементом (ЧЕ) (см).

При замірянні напрузі фотосигналу U (В) визначають інтегральну чутливість фотоприймача до випромінювання АЧТ за співвідношенням

$$S_{\text{інт}} = \frac{U}{E_e K_{\text{пн}} A}, \quad (3)$$

де $S_{\text{інт}}$ – інтегральна чутливість (В/Вт), E_e – енергетична освітленість, визначена за (2) (Вт/см²), $K_{\text{пн}}$ – коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача 4 (рис. 1), A – площа ЧЕ (см²).

У залежності від обраних засобів вимірювальної техніки, режимів та умов вимірювання, від-

Таблиця 2. Основні параметри джерел випромінювання [3, 4]

Параметри джерела випромінювання	Тип джерела випромінювання (лампи розжарювання)				
	КГМ12-100	КГМ24-150	КГМ24-250	РН6-7.5*	РН12-100*
Кольорова температура T_k , К	3200			2850	
Струм лампи (при T_k), А	8,2–8,5	6,0–6,7	9,5–10,5	1,2–1,3	7,3–7,7
Напруга живлення, В	12	24	24	6	12
Споживана потужність, Вт	100	150	250	7,5	100
Сила світла, кд	130–140	180–210	280–340	8,2–8,7	125–135
Світловий потік, лм	3000	5000	8500	90	1750
Освітленість ЧЕ при виконанні вимог точковості джерела, лк	~ (1–104)	~ (1–104)	~ (1–104)	~ (0,1–103)	~ (1–104)
Розміри тіла розжарювання, мм	2,3×4,0	2,9×5,8	3,5×6,5	1,0×1,5	∅=5
Форма тіла розжарювання					

*) джерела випромінювання, яким надають перевагу при вимірюваннях параметрів ФП.

носна похибка вимірювання інтегральної чутливості за розглянутим методом знаходиться в межах 10–15%.

Зазначимо, що вимірювальні схеми, зібрані на базі АЧТ К19.532 або К21.532, забезпечують вимірювання фотоелектричних параметрів приймачів у ширших діапазонах умов і режимів вимірювання, але такі установки не володіють конструктивною завершеністю, що вимагає вищої кваліфікації персоналу й додаткових затрат часу.

Параметри установки К54.410 мають обмежені можливості, проте це – завершена модель, яка широко використовується в серійному виробництві фотоприймачів.

Атестація фотоприймачів у видимій та ближній ІЧ-областях спектра

Для ФП, чутливих у видимій та ближній ІЧ-областях (0,4–3,0 мкм), потрібні АЧТ з температурою порожнини не менше 3000 К. Такі об'єкти існують, але це складні й громіздкі пристрої, які не можна застосувати в промислових умовах. З цієї причини широко використовують лампи розжарювання. Їх номенклатура досить широка, проте в контрольно-вимірювальній апаратурі використовуються лампи з тілом розжарювання у вигляді спіралі спеціальної форми, що дозволяє створити високі рівні потоків випромінювання й рівномірне світлове поле у площині фоточутливого елемента ФП.

У таблиці 2 наведені основні параметри ламп розжарювання, які атестовані як робочі вимірювальні засоби й використовуються при вимірюваннях інтегральної чутливості ФП.

Інтегральну чутливість $S_{\text{ІНТ}}$ пов'язують з типом джерела, оскільки вона є параметром, залежним не тільки від властивостей ФП, але й від спектральної характеристики випромінювання джерела за співвідношенням:

$$S_{\text{ІНТ}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_{\lambda}}{\Phi_{\lambda}} d\lambda, \quad (4)$$

де I_{λ} - фотострум (А), Φ_{λ} - падаючий на ФП оптичний потік випромінювання (Вт, або лм), λ_1 і λ_2 – початок і кінець спектрального діапазону.

Отже, на практиці використовуються лампи розжарювання, атестовані як стандартні джерела зі зазначенням кольорової температури переважно $T_{\text{к}}=2856$ К (джерело типу А), а інтегральна чутливість ФП визначається за відношенням до світлового потоку.

При незмінному розміщенні джерела відносно ФП співвідношення (4) для визначення інтегральної чутливості трансформується до

$$S_{\text{ІНТ}} = \frac{U}{K_{\text{пр}}\Phi}, \quad (5)$$

де $S_{\text{ІНТ}}$ – інтегральна чутливість (А/лм). U – напруга фотосигналу (В), $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт перетворення ППТН-2 [4] (В/А), Φ – світловий потік (лм).

У деяких випадках до паспорту на лампу розжарювання вносять значення сили світла $I_{\text{л}}$. Тоді світловий потік Φ визначається як величина, що дорівнює силі світла лампи розжарювання $I_{\text{л}}$ у тілесному куті ω [3]:

$$\Phi = I_{\text{л}}\omega. \quad (6)$$

Водночас тілесний кут ω при збереженні умов точковості джерела випромінювання визначається так:

$$\omega = A/L^2, \quad (7)$$

де A – площа фоточутливого елемента фотоприймача, L – відстань від джерела випромінювання.

Отже, знаючи площу A , відстань між ФП і джерелом випромінювання та паспортні дані сили світла лампи й коефіцієнта перетворення ППТН-2, визначається інтегральна чутливість випромінювання ФП до джерела типу А.

Лампи розжарювання переважно атестують за кольоровою температурою $T_{\text{к}}$ або $T_{\text{к}}$ і силою світла, з внесенням у паспортні дані режимів живлення, при яких відтворюється їх кольорова температура. Якщо лампа атестована за кольоровою температурою, то для визначення світлового потоку використовують фотометри, наприклад

ТЕС0963, або люксметри-фотометри "Кварц-01", "Тензор-26", Ю116, або атестовані за чутливістю фотометричні голівки. З допомогою цих засобів вимірюється освітленість E у площині ЧЕ, і за відомою величиною його площі A визначають світловий потік:

$$\Phi = EA. \quad (8)$$

Зазначимо, що стандартизовані освітлювачі відсутні. Таке обладнання створюється виробником ФП як нестандартний вимірювальний засіб, який вносить додаткову похибку у вимірювання інтегральної чутливості.

Розповсюдженим елементом установок є фотометрична лава типу ФСМ-4У, оснащення якої забезпечує вимірювання інтегральної чутливості ФП при варіаціях освітленості від 0,1 до $5 \cdot 10^4$ лк. Але установка, зібрана на базі лави ФСМ-4У, є громіздкою, незручною для роботи при серійному виробництві ФП і потребує спеціального (затемненого) приміщення. У серійному виробництві використовується освітлювач типу К22.410 з лампою розжарювання РН12-100 як джерелом випромінювання. Це простий за конструкцією блок, в якому джерело випромінювання й вимірюваний ФП ізольовані від фонових засвічень. Максимальна освітленість у площині фоточутливого елемента ФП 1000 лк без послаблення потоку випромінювання та 100, 10 і 1 лк – при ослабленні світлофільтрами. Для виробничих потреб розроблені складні за конструкцією освітлювачі, наприклад АДБ136.00, який забезпечує широкий діапазон зміни освітленості (10^2 – 10^4 лк) і є універсальним засобом вимірювальної техніки з високими метрологічними характеристиками. Основні недоліки даного освітлювача низька продуктивність і спотворення спектрального складу потоку випромінювання. При використанні установок, до складу яких входять описані освітлювачі, відносна похибка вимірювання інтегральної чутливості знаходиться в межах 5–10%.

Атестація фотоприймачів в ультрафіолетовому діапазоні

Наперед зазначимо, що спектр ультрафіолетової області поділений на три піддіапазони: УФ-С - від 200 до 280 нм, УФ-В – від 280 до 315 нм, УФ-А – від 315 до 400 нм [6].

При визначенні спектральної та інтегральної чутливості фотоприймачів виникають проблеми метрологічного забезпечення вимірювань, переважно через спектральний розподіл потужності випромінювання УФ-джерел.

Як джерела УФ-випромінювання використовують газорозрядні лампи, які володіють часовою нестабільністю, відмінностями у спектральному розподілі потоку випромінювання від екземпляра до екземпляра та зміною цього розподілу впродовж часу експлуатації. Враховуючи це, стає зрозумілим відсутність рекомендацій у нормативній документації [1; 2] щодо джерел, які могли б бути атестовані й використані для вимірювання інтегральної чутливості ФП в УФ-діапазоні.

На рис. 2 наведено схематичний спектральний розподіл джерел випромінювання в УФ-діапазоні. Найкраща просторово-часова стабільність властива воднево-дейтерієвим джерелам (тип ДВС, ДДС, ЛД(D)), а недолік – низька потужність випромінювання. При недостатності потужності використовують ртутні лампи низького тиску (ДРТ, ДРШ), які володіють лінійчастим спектром випромінювання, або ксенонові лампи (ДКсШ). Зазначимо, що чим менша потужність випромінювання ртутних і ксенонових джерел, тим вища їх просторово-часова стабільність.

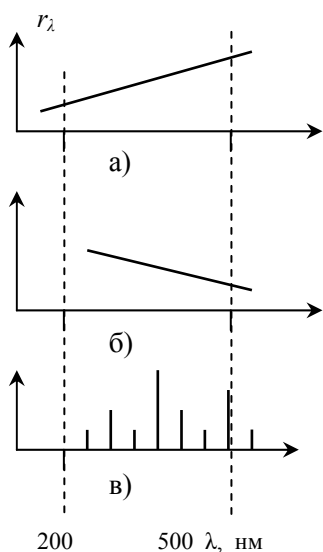


Рис. 2. Схематичний спектральний розподіл джерел випромінювання в УФ-діапазоні: випромінювання електродугової дуги і ксенонової лампи (так званий сонцеподібний розподіл) (а), воднево-дейтерієві джерела (б), ртутні лампи (в)

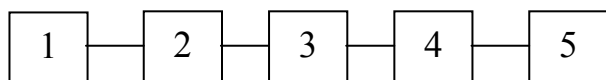


Рис. 3. Структурна схема установки для вимірювання інтегральної чутливості ФП чутливих в УФ-діапазоні: освітлювач з лампою ДРТ-220 (1), блок інтерференційних фільтрів піддіапазонів (2), еталонний або досліджуваний ФП (3), перетворювач струм-напруга ППТН-2 (4), вольтметр типу В7-23 (5)

При використанні ртутних ламп інтегральна чутливість визначається за відомими відносними спектральним розподілом випромінювання джерела і спектральною характеристикою чутливості еталонного фотоприймача, попередньо відкаліброваного за монохроматичною чутливістю за лініями ртуті для кожного із піддіапазонів УФ-випромінювання. Похибка атестації еталонного ФП за чутливістю не повинна перевищувати $\pm 5\%$ у спектральному діапазоні від 200÷500 нм.

Структурна схема установки для вимірювання чутливості ФП в УФ-діапазоні наведена на рис. 3. Зазначимо основні вимоги до структурних елементів установки.

Освітлювач 1 складається з джерела випромінювання та дзеркально-циліндричного коліматора для ламп ДРТ або дзеркально-параболічного для ламп ДВС, ДЕС. Конструкція освітлювача установки повинна забезпечувати енергетичну освітленість у площині кріплення чутливого елемента ФП не менше 0,1 Вт/м².

Максимуми пропускання інтерференційних світлофільтрів 2 відповідають довжинам хвиль ліній ртуті: для піддіапазону УФ-С – $\lambda_{\max}=254$ нм, для УФ-В – 313 нм і для УФ-А – 365 нм [7].

Методику вимірювання монохроматичної чутливості продемонструємо на приладі піддіапазону УФ-С. Після належного прогрівання електричних та електронних блоків, встановлення інтерференційного фільтра з $\lambda_{\max}=254$ нм та встановлення діафрагми діаметром d (у межах 5-7 мм), розміщується еталонний фотоприймач і здійснюється вимірювання фотосигналу U_k . Виконують розрахунок за співвідношенням

$$E_{e1} = \frac{4U_k}{K_{\text{пр}} S_{\text{к1}} \pi d^2}, \quad (9)$$

де E_{e1} – енергетична освітленість у фоточутливій площині еталонного приймача на довжині хвилі $\lambda_{\max}=254$ нм (Вт/м²), $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт перетворення ППТН-2 (В/А), $S_{\text{к1}}$ – струмова монохроматична чутливість еталонного фотоприймача за паспортом (А/Вт), d – діаметр діафрагми (м).

Далі, замість еталонного встановлюється досліджуваний фотоприймач і вимірюється фотосигнал U_d (В). Інтегральна чутливість приймача $S_{\text{інт}}^C$ (А/Вт·м²), віднесена (для конкретного спектрального інтервалу) до енергетичної освітленості, визначається так:

$$S_{\text{інт}}^C = \frac{U_d}{E_{e1} S_{\lambda}^C K_{\text{ДРТ}}^C K_{\text{пр}}}, \quad (10)$$

де E_{e1} – енергетична освітленість, визначена за співвідношенням (9) (Вт/м^2), S_{λ}^C – чутливість вимірюваного ФП на довжині хвилі λ (у даному випадку $\lambda=254$ нм), встановленої із вимірювань його спектральної характеристики чутливості, (в.о.).

Визначимо поняття ідеального фотоприймача. Його відносна спектральна чутливість $S_{\lambda i}^C=1$ у робочому діапазоні і $S_{\lambda i}^C=0$ поза його межами. Розглянемо параметр $K_{\text{ДРТ}}^C$, основний зміст якого – це врахування відмінності форми відносної спектральної чутливості реального S_{λ}^C від форми ідеального $S_{\lambda i}^C$ ФП для ртутних джерел випромінювання. Цей параметр забезпечує перехід від монохроматичної до інтегральної чутливості, тобто врахує спектральний розподіл потужності випромінювання джерела. Визначається він за співвідношенням

$$K_{\text{ДРТ}}^C = \frac{\int_{\lambda=500}^{\lambda=200} S_{\lambda i}^C \cdot r_{\lambda}^{\text{ДРТ}} d\lambda}{\int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{\lambda}^C \cdot r_{\lambda}^{\text{ДРТ}} d\lambda}, \quad (11)$$

де $r_{\lambda}^{\text{ДРТ}}$ – спектральний розподіл потоку випромінювання ртутної лампи (в.о.).

Аналогічно визначається інтегральна чутливість у діапазонах В або А для УФ-випромінювання.

Зазначимо, що методики вимірювання інтегральної чутливості ФП в УФ-діапазоні є досить складними й метрологічно не забезпеченими. Не вдається спростити процес вимірювання $S_{\text{ІНТ}}$, використавши метод порівняння, через параметри, які впливають на результат вимірювання. Це відмінність відносних значень чутливості на робочій довжині хвилі для партії вимірюваних ФП і відмінність спектральних характеристик реальних фотоприймачів. Неврахування цих факторів приводить до зростання похибок вимірювання до 80%.

Водночас, за наведеною нами методикою відносна похибка вимірювання інтегральної чутливості ФП в УФ-діапазоні знаходиться в межах 15–20%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ 21934-83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. – М., 1985.
2. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М., 1988.
3. Васильченко Н.В., Борисов В.А. и др. Измерение параметров приемников оптического излучения. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Бутенко В.К., Годованюк В.М., Докторович І.В. Прецизійний перетворювач струм-напруга // Науковий вісник ЧНУ. Вип. 102: Фізика.Електроніка. – Чернівці: ЧНУ, 2001. – С.84-85.
5. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). – Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. – С. 12-14.
6. Санітарні норми та правила устрою, експлуатації і контролю обладнання, яке генерує електромагнітне випромінювання оптичного діапазону (інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове)ю –Київ: АМН України, 1997.
7. Докторович І.В., Бутенко В.К., Годованюк В.Н., Фодчук І.М., Юрьев В.Г. Методика калибровки УФ-радиометров энергетической освещенности // ТКЭА. – №1. – 2008. – С.57-61.