
ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

УДК 681.586

В. Ю. КУЧЕРУК, П. І. КУЛАКОВ, Т. В. ГНЕСЬ

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНТЕНСИВНОСТІ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

Анотація. У статті запропоновано методику інтерполяції залежності спектральної чутливості фотодіоду від довжини хвилі оптичного випромінювання та удосконалено математичну модель вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку на основі пари фотодіод — операційний підсилювач. Удосконалена модель враховує спектральну характеристику фотодіоду та спектральну характеристику джерела оптичного випромінювання.

Ключові слова: вимірювальне перетворення, фотодіод, інтенсивність світлового потоку, спектральна характеристика, математична модель.

Аннотация. В статье предложена методика интерполяции зависимости спектральной чувствительности фотодиода от длины волны оптического излучения и улучшена математическая модель измерительного преобразователя интенсивности светового потока на основе пары фотодиод — операционный усилитель. Улучшенная модель учитывает спектральную характеристику фотодиода и спектральную характеристику источника оптического излучения.

Ключевые слова: измерительное преобразование, фотодиод, интенсивность светового потока, спектральная характеристика, математическая модель.

Abstract. The paper proposes an interpolation method of the spectral characteristic of the photodiode from wavelength of the optical radiation and improved the mathematical model of the light intensity converter based on the photodiode — operational amplifier pair. An improved model takes into account the spectral response of the photodiode and the spectral characteristic of the source of optical radiation.

Key words: measuring conversion, photodiode, light intensity, spectral characteristic, mathematical model.

ВСТУП

Вимірювальні перетворювачі є невід'ємною складовою будь якого сучасного засобу вимірювальної техніки. В теперішній час існує велика різноманітність вимірювальних перетворювачів за їх принципом дії та конструктивним виконанням. Водночас постійно підвищуються вимоги до їх точності, чутливості, швидкодії. Слід відзначити, що точність багатьох засобів вимірювання дуже часто визначається саме точністю первинного перетворювача, оскільки вторинні засоби вимірювального перетворення мають невелику у порівнянні з первинними перетворювачами похибку [1]. Оптичні і фотоелектричні вимірювальні перетворювачі в теперішній час мають широке поширення. В основу принципу дії оптичних перетворювачів покладена залежність параметрів оптичного випромінювання від значення перетворюваної фізичної величини. Остання може діяти безпосередньо на джерело випромінювання, змінюючи його інтенсивність, або впливаючи на параметри оптичного потоку. Фотоелектричні вимірювальні перетворювачі здійснюють перетворення оптичних параметрів світлового потоку в електричний сигнал. *Метою статті* є подальший розвиток теорії розробки та аналізу фотоелектричних вимірювальних перетворювачів інтенсивності світлового потоку в постійну напругу.

У роботах [1—3] розглянуто математичні моделі вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку на основі пари фотодіод — операційний підсилювач. У цих моделях не враховано спектральну характеристику фотодіоду — залежність його інтегральної струмової чутливості від довжини хвилі оптичного випромінювання, та спектральну характеристику джерела оптичного

випромінювання. Виходячи з цього, удосконалення існуючої моделі у цьому напрямку є важливим та актуальним завданням, вирішення якого дозволить підвищити точність моделювання та розрахунку фотоелектричних вимірювальних перетворювачів фізичних величин та засобів вимірювання на їх основі.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У відповідності з [4, 5], характер спектральної характеристики фотодіоду залежить від великої кількості факторів та фізичному аналізу практично не піддається. На основі аналізу матеріалів провідних виробників оптоелектронних компонентів [6—10], можна зробити висновок, що спектральна характеристика фотодіоду має дзвоноподібну форму, дорівнює нулю при певних значеннях довжини хвилі оптичного випромінювання, може бути симетричною та асиметричною, при чому коефіцієнт асиметрії може бути менше нуля і більше нуля. Пропонується шукати функцію, яка інтерполює спектральну характеристику фотодіоду, у вигляді

$$g(x) = x^{a-1}(1-x)^{b-1}, \quad (1)$$

де a, b — певні чисельні параметри функції, від співвідношення між якими залежить асиметрія її графіку.

Якщо $a > b$, коефіцієнт асиметрії менше нуля і максимум функції зміщений вліво, якщо $a < b$, коефіцієнт асиметрії більше нуля і максимум функції зміщений вправо. У випадку, якщо $a = b \neq 1$, то функція симетрична, якщо $a = 1$ та $b = 1$, то графіком функції є пряма лінія. Значення цієї функції дорівнює нулю, якщо $x = 0$, або $x = 1$. Виходячи з цього, функцію (1) можна взяти за основу для знаходження інтерполюючої функції спектральної характеристики фотодіоду. Нехай

$$x = \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}}, \quad (2)$$

де λ — довжина хвилі оптичного випромінювання; λ_{MAX} — гранична довжина хвилі оптичного випромінювання, при якій значення спектральної чутливості дорівнює нулю.

Представимо інтерполюючу функцію спектральної характеристики фотодіоду у вигляді

$$S_{I0}(\lambda) = K_A \left(\frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{a-1} \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{b-1}, \quad (3)$$

де K_A — коефіцієнт пропорційності між базовою функцією (1) та значенням спектральної чутливості фотодіоду.

Для знаходження аналітичного виразу інтерполюючої функції спектральної характеристики необхідно знайти коефіцієнт K_A та параметри a і b . Знайдемо значення λ_0 , при якому функція (3) досягає максимуму. Для цього визначимо першу похідну функції (3) та прирівняємо її до нуля.

$$S'_{I0}(\lambda) = (a-1) \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{b-1} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{a-2} - (b-1) \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{b-2} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{a-1} = 0. \quad (4)$$

В результаті розв'язання рівняння (4), отримуємо довжину хвилі оптичного випромінювання, при якій спектральна характеристика фотодіоду досягає максимуму

$$\lambda_0 = \lambda_{MAX} \left(1 + \frac{b-1}{a-1} \right)^{-1}. \quad (5)$$

З виразу (5) після нескладних перетворень отримуємо

$$b = \left(\frac{\lambda_{MAX}}{\lambda_0} - 1 \right) (a-1) + 1. \quad (6)$$

Підставивши (6) в (3), отримуємо максимальне значення спектральної характеристики фотодіоду

$$S_{I0}(\lambda_0) = K_A \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right)^{(a-1)} \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right)^{\left(\frac{\lambda_{MAX}}{\lambda_0} - 1 \right) (a-1)}. \quad (7)$$

З (7) знаходимо вираз, який визначає коефіцієнт K_A

$$K_A = S_{I0}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right)^{(1-a)} \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right)^{\left(\frac{\lambda_{MAX}}{\lambda_0} - 1 \right) (1-a)}. \quad (8)$$

Експериментальні спектральні характеристики фотодіодів, які наводяться у технічній документації, отримані в діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання від λ_{MIN} до λ_{MAX} [6—10]. При довжині хвилі λ_{MIN} значення спектральної характеристики може як відрізнятися від нуля, так і дорівнювати нулю. Значення інтерполюючої функції при довжині хвилі λ_{MIN} визначається виразом

$$S_{I0}(\lambda_{MIN}) = K_A \left(\frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}} \right)^{(a-1)} \left(1 - \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}} \right)^{\left(\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0} \right)^{(a-1)}}. \quad (9)$$

З (9) знаходимо вираз, який визначає коефіцієнт K_A

$$K_A = S_{I0}(\lambda_{MIN}) \left(\frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}} \right)^{(1-a)} \left(1 - \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}} \right)^{\left(\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0} \right)^{(1-a)}}. \quad (10)$$

Прирівняємо праві частини виразів (8) та (10)

$$S_{I0}(\lambda_0) \left(\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right) \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{1-a} = S_{I0}(\lambda_{MIN}) \left(\left(\frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}} \right) \left(1 - \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{1-a}. \quad (11)$$

В результаті розв'язання рівняння (11), отримуємо вираз, за допомогою якого визначається значення параметру a

$$a = 1 - \left(\frac{\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX} - \lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}}}{\left(\frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}} \right) \left(1 - \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}}} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Параметри λ_{MAX} , λ_{MIN} , λ_0 , $S_{I0}(\lambda_{MIN})$ та $S_{I0}(\lambda_0)$ визначаються за експериментальною спектральною характеристикою фотодіоду. Шляхом підстановки розрахованого за виразом (12) значення параметру a до виразу (6) визначається значення параметру b . Після цього за допомогою виразу (10) або (8) розраховується значення K_A . Узагальнюючий вираз для функції, яка інтерполює спектральну характеристику фотодіоду, отримуємо шляхом підстановки виразів (12), (6) та (8) до (3).

$$S_{I0}(\lambda) = S_{I0}(\lambda_0) \times \left(\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right) \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{\left(\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX} - \lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{-1}} \times \\ \times \left(\frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{\left(\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX} - \lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{-1}} \times \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{\left(\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0} \right)^{\left(\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX} - \lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{-1}}}. \quad (13)$$

На рис. 1 наведено типовий експериментальний графік залежності відносної спектральної чутливості фотодіоду, яка визначається як відношення $S_{I0}(\lambda)/S_{I0}(\lambda_0)$, виражене у відсотках, від довжини хвилі оптичного випромінювання, та графік отриманої інтерполюючої функції.

На рис. 2а наведено електричну принципову схему вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку на основі пари фотодіод — операційний підсилювач, а на рис. 2б — його еквівалентну схему.

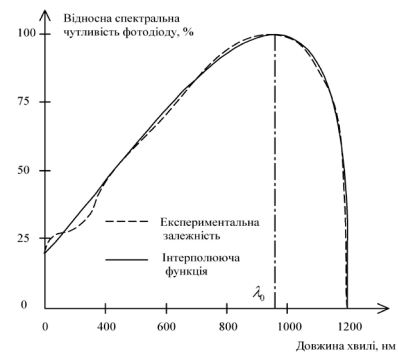


Рис. 1. Типова залежність відносної спектральної чутливості фотодіоду від довжини хвилі оптичного випромінювання, та графік інтерполюючої функції

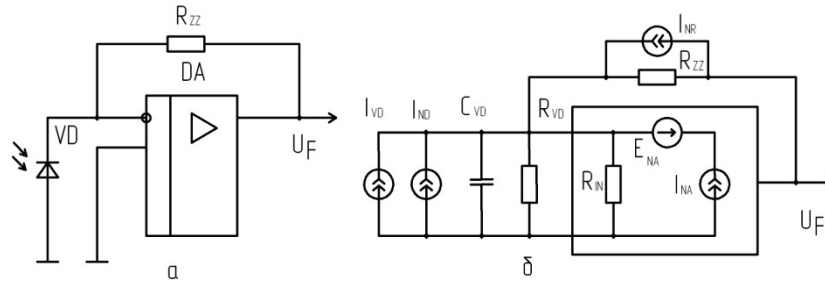


Рис. 2. Вимірювальний перетворювач інтенсивності світлового потоку на основі пари фотодіод — операційний підсилювач

Залежність струму, що протікає через фотодіод, від потоку випромінювання, описується виразом [11]

$$I_{VD} = \frac{\Phi S_{I_0}(\lambda)}{\sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})^2}} - I_S \left(\exp\left(\frac{e U_{VD}}{kT}\right) - 1 \right), \quad (14)$$

де I_{VD} — струм фотодіоду; Φ — потік випромінювання; I_S — темновий струм фотодіоду; U_{VD} — падіння напруги на фотодіоді; T — абсолютна температура; k — постійна Больцмана; e_e — заряд електрону; Ω — циклічна частота модуляції потоку опромінювання; τ_{VD} — постійна часу фотодіоду, яка залежить від величин внутрішнього опору фотодіоду R_{VD} та паразитної ємності фотодіоду C_{VD} .

При використанні джерела світла з конденсорною лінзою, можна отримати плоско — паралельний потік опромінювання, однакового на всій площині. У цьому випадку потік опромінювання та площа фоточутливого шару фотодіоду, що опромінюється, зв'язані співвідношенням [12]

$$\Phi = I(\lambda) \cdot S, \quad (15)$$

де $I(\lambda)$ — інтенсивність променевого потоку, яка при використанні будь-якого джерела світла є функцією довжини хвилі λ ; S — площа фоточутливого шару фотодіоду, що освітлюється.

Вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод — операційний підсилювач, з урахуванням зміщення нуля, різниці вхідних струмів, напруги шуму, описується виразом [13]

$$U_F = \frac{I_{VD} R_{ZZ}}{1 + R_{ZZ}/K_0 R_{IN} + 1/K_0} + \Delta I R_{ZZ} + U_{SM} + U_N, \quad (16)$$

де K_0 — коефіцієнт передачі операційного підсилювача; R_{IN} — вхідний опір операційного підсилювача; U_{SM} — напруга зміщення нуля операційного підсилювача; ΔI — різниця вхідних струмів операційного підсилювача; R_{ZZ} — опір в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача; U_N — напруга шуму на виході фотоприймача.

Щільність шумового струму опору зворотного зв'язку [14]

$$I_{NR} = \sqrt{4kT \Delta f / R_{ZZ}}, \quad (17)$$

де Δf — ефективна смуга пропускання електронного тракту.

Щільність шумового струму фотодіоду, що працює у фотовольтаїчному режимі [2]

$$I_{ND} = \sqrt{4kT \Delta f / R_{VD}}. \quad (18)$$

Модуль вихідної напруги шуму визначається виразом [14]

$$U_N = \sqrt{E_{NA}^2 + (I_{NA}^2 + I_{ND}^2 + I_{NR}^2) R_{ZZ}}, \quad (19)$$

де I_{NA} — шумовий струм операційного підсилювача; E_{NA} — шумова напруга операційного підсилювача.

Підставивши (13), (14), (15), (17), (18), (19) в (16), та провівши нескладні перетворення, отримуємо вираз, який визначає залежність вихідної напруги фотоелектричного вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку на основі пари фотодіод — операційний підсилювач, від довжини хвилі оптичного випромінювання.

$$\begin{aligned}
 U_F(\lambda) = & \left(S_{I0}(\lambda_0) \times \left(\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right) \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX}-\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}-\lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}}} \right)^{-1} \times \\
 & \times \left(\frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{-\left(\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX}-\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}-\lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{-1}} \times \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{-\left(\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0} \right) \left(\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX}-\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}-\lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{-1}} \right) \times \\
 & \times \frac{R_{ZZ} S}{(1 + R_{ZZ}/K_0 R_{IN} + 1/K_0) \sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})^2}} I(\lambda) - \frac{I_S R_{ZZ} \left(\exp \left(\frac{e_e U_{VD}}{kT} \right) - 1 \right)}{1 + R_{ZZ}/K_0 R_{IN} + 1/K_0} + \Delta I R_{ZZ} + U_{SM} + \\
 & + \sqrt{E_{NA}^2 + \left(I_{NA}^2 + 4kT \Delta f / R_{VD} + 4kT \Delta f / R_{ZZ} \right) R_{ZZ}}.
 \end{aligned} \tag{20}$$

Позначимо через λ_1 та λ_2 відповідно нижню та верхню граничні довжини хвилі спектральної характеристики джерела оптичного випромінювання. Тоді вихідна напруга вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку на основі пари фотодіод — операційний підсилювач визначається за виразом

$$\begin{aligned}
 U_F = & \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(S_{I0}(\lambda_0) \times \left(\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right) \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_{MAX}} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX}-\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}-\lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}}} \right)^{-1} \times \\
 & \times \left(\frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{-\left(\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX}-\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}-\lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{-1}} \times \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \right)^{-\left(\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0} \right) \left(\log \frac{S_{I0}(\lambda_0)}{S_{I0}(\lambda_{MIN})} \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_{MAX}-\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}-\lambda_0} \right)^{\frac{\lambda_{MAX}-1}{\lambda_0}} \right)^{-1}} \right) \times \\
 & \times \frac{R_{ZZ} S}{(1 + R_{ZZ}/K_0 R_{IN} + 1/K_0) \sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})^2}} I(\lambda) d\lambda - \frac{I_S R_{ZZ} \left(\exp \left(\frac{e_e U_{VD}}{kT} \right) - 1 \right)}{1 + R_{ZZ}/K_0 R_{IN} + 1/K_0} + \Delta I R_{ZZ} + U_{SM} + \\
 & + \sqrt{E_{NA}^2 + \left(I_{NA}^2 + 4kT \Delta f / R_{VD} + 4kT \Delta f / R_{ZZ} \right) R_{ZZ}}.
 \end{aligned} \tag{21}$$

Вираз (21) уявляє собою математичну модель вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку на основі пари фотодіод — операційний підсилювач, яка враховує залежність спектральної чутливості фотодіоду від довжини хвилі оптичного випромінювання, та спектральну характеристику джерела оптичного випромінювання.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень запропоновано методику інтерполяції залежності спектральної чутливості фотодіоду від довжини хвилі оптичного випромінювання. Шляхом використання отриманої інтерполюючої функції удосконалено відому математичну модель вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку на основі пари фотодіод — операційний підсилювач. Вищевказана удосконалена модель враховує залежність спектральної чутливості фотодіоду від довжини хвилі оптичного випромінювання та спектральну характеристику джерела оптичного випромінювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Volodymyr A. Podzharenko and Pavlo I. Kulakov. Photoelectric angle converter. Proc. SPIE 4425, Selected papers from the international conference on optoelectronic information technologies, 452 (June 12, 2001); doi 10.1117/12.429768; <http://dx.doi.org/10.1117/12.429768>
2. Кучерук, В. Ю. Фотоелектричне вимірювальне перетворення площа–напруга [Текст] / В. Ю. Кучерук, С. А. Паламарчук, П. І. Кулаков, Т. В. Гнесь, Ю. Є. Блохін // Міжнародний науково–технічний журнал «Оптико–електронні інформаційно–енергетичні технології». — 2014. — № 1 (27). — С. 139–145.
3. Васілевський, О. М. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів: монографія [Текст] / О. М. Васілевський, П. І. Кулаков — Вінниця. : ВНТУ, 2011. — 176 с.
4. Носов, Ю. Р. Оптрони и их применение [Текст] / Ю. Р. Носов, А. С. Сидоров. — М. : Радио и связь, 1981. — 280 с.
5. Амброзяк А. Л. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. — М. : Сов. радио, 1971. — 128 с.
6. Everlight Americas Inc. [Електронний ресурс] / Everlight Americas Inc. — Режим доступу : <http://everlightamericas.com> — 21.06.2015. — Заголовок з екрану
7. Infineon Technologies AG [Електронний ресурс] / Infineon Technologies AG — Режим доступу : <https://www.infineon.com> — 21.06.2015. — Заголовок з екрану
8. ОПТЕК — TT electronics Company [Електронний ресурс] / ОПТЕК — TT electronics Company — Режим доступу : <http://optekinc.com> — 21.06.2015. — Заголовок з екрану
9. Hamamatsu Photonics [Електронний ресурс] / Hamamatsu Photonics — Режим доступу : <http://www.hamamatsu.com> — 21.06.2015. — Заголовок з екрану
10. AMS–TAOS USA Inc. [Електронний ресурс] / AMS–TAOS USA Inc. — Режим доступу : <http://www.taosinc.com> — 21.06.2015. — Заголовок з екрану
11. Аксененко, М. Д. Микроэлектронные фотоприемные устройства [Текст] / М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников, О. В. Смолин. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 208 с.
12. Кузьмичев, В. Е. Законы и формулы физики [Текст] / В. Е. Кузьмичев. — К. : Наукова думка, 1989. — 864 с.
13. Ишанин, Г. Г. Источники и приемники излучения [Текст] : учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г. В. Польщиков. — СПб. : Политехника, 1991. — 240 с.
14. Калниболотский, Ю. М. Проектирование электронных схем [Текст] / Ю. М. Калниболотский, В. С. Рысин. — К. : Техніка, 1976. — 144 с.

SPUSOK LITERATURU

1. Volodymyr A. Podzharenko and Pavlo I. Kulakov. Photoelectric angle converter. Proc. SPIE 4425, Selected papers from the international conference on optoelectronic information technologies, 452 (June 12, 2001); doi 10.1117/12.429768; <http://dx.doi.org/10.1117/12.429768>.
2. Kucheruk, V. Photoelectric conversion area measuring-voltage [Text] / V. Kucheruk, E. Palamarchuk, P. Kulakov, T. Hnes, Blokhin Y // International scientific journal «Optoelectronic information-power technologies.» — 2014. — № 1 (27). — 139 — 145 p.
3. Wasilewski, A. Elements theory increase measurement accuracy and synchronization of rotor angular velocity interconnected electric motors: monography [Text] / A. Wasilewski, P. Kulakov — Vinnytsia. : VNTU, 2011. — 176 p.
4. Nosov Y. Optrons Application [Text] / J. R. Nosov, A. Sidorov. — Moscow: Radio and communication, 1981. — 280 p.
5. Ambrozyak AL Constructions and Technologies semiconductors photoelectrical devices. — Moscow: Sov. radio, 1971. — 128 p.
6. Everlight Americas Inc. [Electronic resource] / Everlight Americas Inc. — Access: <http://everlightamericas.com> — 21.06.2015. — Title screen.
7. Infineon Technologies AG [electronic resource] / Infineon Technologies AG — Access: <https://www.infineon.com> — 21.06.2015. — Title screen.
8. ОПТЕК — TT electronics Company [electronic resource] / ОПТЕК — TT electronics Company — Access: <http://optekinc.com> — 21.06.2015. — Title screen.
9. Hamamatsu Photonics [electronic resource] / Hamamatsu Photonics — Access:

- <http://www.hamamatsu.com> — 21.06.2015. — Title screen.
10. AMS-TAOS USA Inc. [Electronic resource] / AMS-TAOS USA Inc. — Access: <http://www.taosinc.com> — 21.06.2015. — Title screen.
 11. Aksenenko, M. Microelectronic photodetector device [Text] / MD Aksenenko, M., Baranochnykov, A. Smolyn. — M. : Energoatomizdat, 1984. — 208 p.
 12. Kuzmicheva, V. Laws of physics and the formula [Text] / V. Kuzmicheva. — K. : Naukova Dumka, 1989. — 864 p.
 13. Yshanyyn, G. Sources and receiver radiation [Text]: Textbook / G. Yshanyyn, E. Pankow, A. Andreev, G. Polschykov. — SPb. : Polytechnics, 1991. — 240 p.
 14. Kalnybolotskyu, Y. Designing electrical schemes [Text] / M. Kalnybolotskyu, V. Rysyn. — K. : Technology, 1976. — 144 p.

Надійшла до редакції 2.11.2015 р.

КУЧЕРУК ВОЛОДИМИР ЮРІЙОВИЧ — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри МПА, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

КУЛАКОВ ПАВЛО ІГОРОВИЧ — кандидат технічних наук, доцент кафедри МПА, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ГНЕСЬ ТЕТЯНА ВІКТОРІВНА — аспірант кафедри МПА, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.