

В.М. Ночвай, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

## Проектування та дослідження електронного блоку пірометра для вимірювання потоку випромінювання твердих частинок у двофазному потоці

Удосконалено вимірвальний прилад контролю витрат кисню газового пальника з використанням нескладної інструментальної бази, яка не вимагає високого рівня кваліфікації оператора. Виконано проектування та дослідження електронного блоку пірометра. Пірометр призначений для вимірювання потоку частинок у високотемпературному двофазному потоці. Робочий діапазон спектра електромагнітних хвиль від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м.

Виконано обґрунтування вибору приймача випромінювання та проведено розрахунок електричного сигналу на приймачі випромінювання. Приймачем випромінювання є фотодіод ФД-25К, який є селективним, має невелику інерцію, невеликі розміри, працює при невеликій напрузі джерела живлення. Спектральний діапазон вимірювання потоку випромінювання полум'я обмежено спектральною чутливістю приймача випромінювання (довжина хвилі  $0,5 \cdot 10^{-6}$  ...  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м).

Виконано проектування підсилювача сигналу. Підсилювачем сигналу є перетворювач електричного струму фотодіода в напругу. Фотодіод ввімкнено в фотогальванічному режимі (без напруги зсуву), що забезпечує відсутність темнового струму. В дослідженні приведено розрахункові та експериментальні значення параметрів електронного блоку вимірвального приладу.

**Ключові слова:** потік випромінювання; тверді частинки; кисень; полум'я; вимірвальний прилад; підсилювач сигналу; приймач випромінювання.

**Постановка проблеми.** При виконанні контролю стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші пальника необхідно визначати хімічний склад продуктів згорання цієї суміші. Визначення хімічного складу продуктів згорання газоаналізаторами і хроматографами вимагають багато часу проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю. Виконувати контроль витрат кисню газових пальників неможливо без застосування складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю. Крім того, контроль стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші пальника неможливо проводити оперативно та вчасно реагувати на його зміну. Тому вдосконалення засобу контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в пальній суміші пальника, є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми.** В роботі [2, с. 75] встановлено, що головним джерелом випромінювання продуктів згорання газоподібних палив є молекули вуглекислого газу та води, енергія їх випромінювання зосереджена в спектральних смугах з максимумами випромінювання, що відповідають довжинам електромагнітних хвиль 1,38, 1,87, 1,9, 2,7, 4,3, 6,3, 15 мікрометрів та смуги випромінювання, що відповідає довжині хвилі  $(18...75) \cdot 10^{-6}$  м. Випромінювання частинок сажі, які знаходяться в високотемпературному двофазному потоці газ-тверді частинки, мають суцільний спектр випромінювання, оскільки випромінюють енергію всіх довжин хвиль у видимому та інфрачервоному діапазонах спектра. Визначено діапазон вимірювання потоку випромінювання твердих частинок в області спектра електромагнітних коливань з довжиною хвилі від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м, який дає можливість застосовувати оптико-електронні прилади (ОЕП), в конструкцію яких не входять інтерференційні фільтри, оскільки в цій області спектра газу прозорі [2, с. 75].

Для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію використовують фотоелектричні (фотонні, або селективні) та теплові (неселективні) приймачі випромінювання [6, с. 98]. До селективних приймачів належать фотодіоди, які мають невеликі габарити, можливість працювати при невеликій напрузі джерела живлення [4, с. 155]. Область спектральної чутливості фотодіодів: германієвих  $(0,4...1,9) \cdot 10^{-6}$  м з максимумом чутливості на довжині хвилі  $1,6 \cdot 10^{-6}$  м; кремнієвих  $(0,5...1,2) \cdot 10^{-6}$  м з максимумом чутливості на довжині хвилі  $1,0 \cdot 10^{-6}$  м. Інтегральна чутливість складає  $(10...20) \cdot 10^{-3}$  А/лм та  $(3...20) \cdot 10^{-3}$  А/лм для германієвих та кремнієвих фотодіодів відповідно [1, с. 196].

Для створення підсилювача сигналу з великим коефіцієнтом підсилення використовують мікросхеми серії К140, які є операційними підсилювачами сигналу [5, с. 330].

**Постановка завдання.** Метою даної статті є підвищення швидкодії та спрощення засобу контролю витрат кисню із застосуванням нескладної інструментальної бази.

**Обґрунтування вибору приймача випромінювання.** На підставі результатів аналізу властивостей та характеристик полум'я газового пальника, класифікації приймачів випромінювання, а також, відповідно до вибраного діапазону вимірювання потоку випромінювання полум'я, вироблено вимоги до приймача випромінювання: область спектральної чутливості  $(0,5...1,1) \cdot 10^{-6}$  м; селективний; мало інерційний; має невеликі габарити; можливість роботи при невеликій потужності, що споживається. Таким вимогам відповідають фотонні приймачі з внутрішнім фотоелементом, а саме фотодіоди.

При виборі типу фотодіода в якості приймача потоку випромінювання у першу чергу необхідно керуватись його спектральною чутливістю і можливістю разом з оптичною системою ОЕП вирішувати задачі оптимальної оптичної спектральної фільтрації при виділенні сигналів на тлі перешкод.

Спектральні характеристики серійних фотодіодів суттєво відрізняються (рис. 1) [4, с. 156].

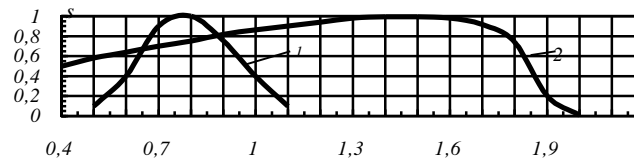


Рис. 1. Спектральні характеристики серійних фотодіодів: 1 – крем.  $\lambda, \times 10^{-6}$  м германієвого

Згідно з вибраним діапазоном вимірювання потоку випромінювання твердих частинок (інтервал довжин хвиль від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м) [2, с. 75] та з метою обмеження спектрального діапазону спектральною чутливістю приймача випромінювання, застосовано кремнієвий фотодіод ФД-25К.

**Розрахунок електричного сигналу на приймачі випромінювання.** Електричний сигнал приймача виражають в міліамперах. Але для електронної схеми необхідно електричний сигнал представити у вигляді напруги. Для фотодіодів, що працюють у вентильному режимі (внутрішній опір приймача  $R_l = \text{const}$ ), точне визначення напруги електричного сигналу  $U_s$  аналітично неможливе; напругу електричного сигналу  $U_s$  необхідно визначати графоаналітичним способом. Основне рівняння фотодіода:

$$I_{sc} = I_s \left( \exp \frac{eU_{ph}}{A_s kT} - 1 \right) + \frac{U_{ph}}{R_l}; \quad (1)$$

де  $I_{sc}$  – струм короткого замикання;  $I_s$  – струм насичення;  $e$  – заряд електрона;  $U_{ph}$  – напруга на фотодіоді;  $A_s$  – коефіцієнт, що залежить від типу фотодіода, для кремнієвого фотодіода  $A_s = 1$ ;  $T$  – температура фотодіода, К;  $k$  – постійна Больцмана;  $R_l$  – опір навантаження [3, с. 23].

Якщо  $R_l = \infty$ , то:

$$U_{ph} = U_s = \frac{A_s kT}{e} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right). \quad (2)$$

З формули (2) випливає, що  $U_s$  є нелінійною функцією від  $I_{sc}$ . Якщо  $R_l \neq \infty$ , то рівняння (2) перетворюється трансцендентне та визначити  $U_s$  можна лише графічним шляхом.

Опір р-п переходу при  $U_{ph} = 0$  позначимо як:

$$R_0 = A_s kT / eI_s; \quad (3)$$

приймемо:  $\alpha = R_l / R_0$ ;  $\beta = I_l / I_s$ ;  $I_l = U_{ph} / R_l$ . Тоді рівняння (2) приймає вид:

$$\frac{I_{sc}}{I_s} = e^{\alpha\beta} - (1 - \beta), \text{ або } \frac{I_l}{I_{sc}} = \frac{\beta}{\exp(\alpha\beta) - (1 - \beta)}. \quad (4)$$

З рівняння (4) отримаємо:

$$I_l / I_{sc} = f(I_{sc} / I_s, \alpha). \quad (5)$$

На рисунку 2а, б приведено залежності:

$$\varphi = \frac{I_l / I_{sc}}{I_l / I_{sc}} = f(I_{sc} / I_s, \alpha), \quad \psi = \frac{I_l}{I_{sc}} = f(\alpha); \quad (6)$$

при  $I_{sc} / I_s = 10^{-4}$ , які дають можливість виконати розрахунки по визначенню оптимальних режимів роботи і параметрів схеми при заданих параметрах фотодіода:

$$I_l = \varphi \cdot \psi \cdot I_{sc}; \quad U_s = U_{ph} = \varphi \cdot \psi \cdot I_{sc} \cdot R_l. \quad (7)$$

Для вибраного екземпляра фотодіода ФД-25К шляхом вимірювання визначено такі значення параметрів: струм насичення  $I_s = 38 \cdot 10^{-6}$  А; струм короткого замикання  $I_{sc} = 40 \cdot 10^{-6}$  А; внутрішній опір приймача  $R_0 = 7 \cdot 10^5$  Ом. Опір навантаження  $R_l = 13 \cdot 10^3$  Ом. Тоді  $\alpha = 0,0185$ ,  $I_{sc} / I_s = 1,05$ .

По кривим залежностей, приведених на рисунку 2 графічним способом, визначено:  $\varphi = 0,998$ ;  $\psi = 0,9$ . Звідси визначено:  $I_l = 0,998 \cdot 0,9 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 35,93 \cdot 10^{-6}$  А. Після підстановки чисельних значень  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $I_{sc}$  та  $R_l$  у формулу (7) отримано:  $U_s = U_{ph} = 0,998 \cdot 0,9 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 13 \cdot 10^3 = 0,467$  В.

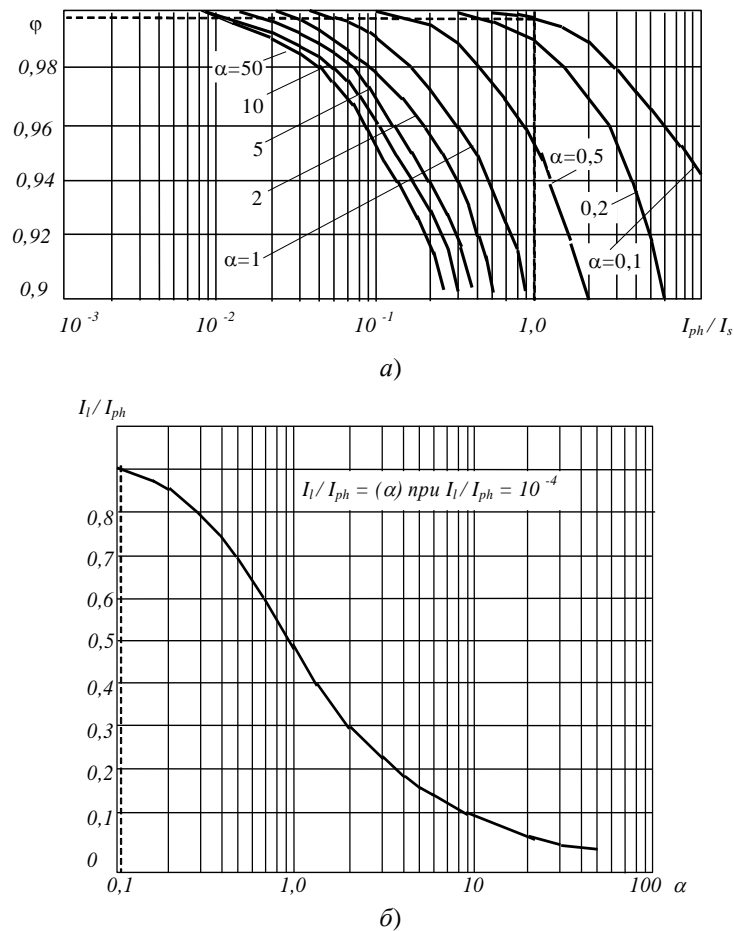


Рис. 2. Визначення сигналу фотодіода [3, с. 24]

**Проектування підсилювача сигналу.** При проектуванні підсилювача сигналу застосовано перетворювач струм-напруга в парі з фотодіодом. Ввімкнення фотодіода у фотогальванічному режимі (без напруги зсуву) на малоомне навантаження зменшує температурний коефіцієнт інтегральної чутливості. Ще одна перевага такого ввімкнення – відсутність темного струму, що особливо важливо у випадку гальванічного зв'язку з наступними каскадами при вимірюванні безупинних світлових потоків. Важливою перевагою схеми є те, що при зміні опорного резистора зворотного зв'язку  $R_{bf}$  від сотень ом до декількох мегаом можна вимірювати освітленості, що відрізняються в сотні тисяч разів.

Напругу на виході підсилювача та опір резистора зворотного зв'язку визначено за формулами:

$$U_{out} = R_{bf} I_{ph}, \quad R_{bf} = U_{out} / I_{ph}. \quad (8)$$

Прийнято напругу живлення підсилювача  $U_{ж\ стаб} = \pm 7,8$  В. Тоді найбільше можливе значення напруги на виході підсилювача  $U_{out} = 7,8$  В, а опір резистора при  $I_{ph} = I_l$  дорівнює:  $R_{bf} = 0,217 \cdot 10^6$  Ом. Прийнято значення опорного резистора зворотного зв'язку рівним  $2 \cdot 10^5$  Ом. В якості підсилювача застосовано мікросхему типу К140УД6.

Оскільки сигнальний струм фотодіода пропорційний освітленості  $E$  та інтегральної чутливості фотодіода  $S$  ( $I_{ph} = E \cdot S$ ), то напругу на виході підсилювача, з урахуванням формули (8), визначено за виразом:

$$U_{out} = E \cdot S \cdot R_{bf} = I_{ph} \cdot R_{bf}; \quad (9)$$

і після підстановки числових значень струму  $I_l$  та опорного резистора зворотного зв'язку  $R_{bf}$  в формулу (9) отримано:  $U_{out} = 7,186 \approx 7,2$  В.

**Дослідження електричних параметрів ОЕП.** Графічним методом визначено струм навантаження  $I_l = 35,9 \cdot 10^{-6}$  А та напругу сигналу  $U_s = 0,467$  В на виході фотодіода, а шляхом розрахунку визначено напругу на виході підсилювача сигналу  $U_{out} = 7,2$  В. Необхідно експериментальним шляхом визначити електричні параметри ОЕП і порівняти їх значення з розрахунковими. Дослідження проведено із застосуванням установки, зображеної на рисунку 3.

Джерелом випромінювання є розжарена вольфрамова нитка лампи РН8-20, попередньо «відпалена» на номінальних режимах впродовж 10 % від загального терміну служби. Освітлювач *I* та ОЕП *III* встановлено горизонтально, їх оптичні осі співпадають на осі *II*.

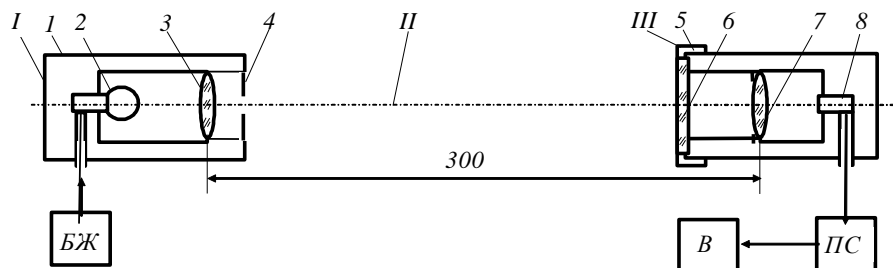


Рис. 3. Схема установки дослідження ОЕП:

*I* – освітлювач ОИ-19: 1 – корпус освітлювача; 2 – лампа розжарювання мод. РН8-20; 3 – розсіювальна лінза; 4 – діафрагма; БЖ – блок живлення; *II* – оптична вісь; *III* – ОЕП; 5 – корпус давача ОЕП; 6 – світлофільтр; 7 – лінза; 8 – приймач випромінювання; ПС – підсилювач сигналу; В – вольтметр.

Відстань від розсіювальної лінзи 3 освітлювача ОИ-19 до лінзи 8 фотооб'єктива ОЕП дорівнює 0,3 м. Лампа розжарювання 2, потужністю 20 Вт, живиться змінним струмом від блоку живлення БЖ, який забезпечує регулювання сили струму в електричному колі лампи в межах 1,45...2,52 А. Регулювання величини потоку випромінювання нитки лампи розжарювання виконано за допомогою діафрагми 4.

При виконанні дослідів виконано вимірювання фотоструму  $I_{ph}$  фотодіода, напруги  $U_s$  на виході фотодіода та напруги  $U_{out}$  на виході підсилювача сигналу з застосуванням вимірювальних приладів типу 43101 (рис. 4).

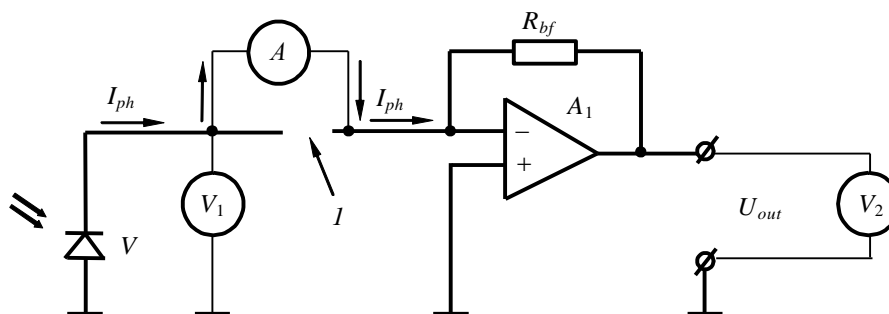


Рис. 4. Схема вимірювань електричних параметрів спрощеного ОЕП:

$A_1$  – операційний підсилювач;  $V$  – фотодіод;  $R_{bf}$  – резистор зворотного зв'язку;  $I_{ph}$  – струм фотодіода;  $A$  – амперметр;  $V_1, V_2$  – вольтметри;  $I$  – розрив провідника струму на час проведення експерименту

Після статистичної обробки результатів експерименту отримано середні арифметичні значення струму фотодіода  $I_{ph}$ , напруги на виході фотодіода  $U_s$  та на виході операційного підсилювача сигналу  $U_{out}$  (див. табл. 1). Напруга  $U_{out}$  на виході підсилювача знаходиться у прямо пропорційній залежності від фотоструму  $I_{ph}$  фотодіода.

Таблиця 1

Середні арифметичні значення результатів вимірювань потоку випромінювання вольфрамової нитки лампи розжарювання

Номер дослідів, $i$	Струм фотодіода $I_{ph}, 10^{-6}$ А	Напруга на виході		Номер дослідів, $i$	Струм фотодіода $I_{ph}, 10^{-6}$ А	Напруга на виході	
		фотодіода $U_{ph},$ В	підсилювача $U_{out},$ В			фотодіода $U_{ph},$ В	підсилювача $U_{out},$ В
1	2	0,050	0,28	11	22	0,430	4,0
2	4	0,105	0,68	12	24	0,445	4,4
3	6	0,126	1,0	13	26	0,450	4,8
4	8	0,250	1,40	14	28	0,450	5,2
5	10	0,290	1,75	15	30	0,455	5,6
6	12	0,340	2,10	16	32	0,455	6,0
7	14	0,360	2,50	17	34	0,460	6,4
8	16	0,390	2,90	18	36	0,464	6,8
9	18	0,400	3,2	19	38	0,465	7,2
10	20	0,420	3,6				

Результати проведених досліджень підтверджують достовірність значень параметрів оптико-електронного приладу, до яких належать, зокрема, задовільна збіжність результатів експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків (табл. 2).

Таблиця 2

## Розрахункові та експериментальні значення параметрів ОЕП

№ з/п	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення параметра	
			розрахункове	експериментальне
1	Струм навантаження фотодіода, $I_l$	А	$35,9 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$
2	Струм насичення фотодіода, $I_s$	А	–	$38 \cdot 10^{-6}$
3	Струм короткого замикання фотодіода, $I_{sc}$	А	–	$40 \cdot 10^{-6}$
4	Напруга сигналу, $U_s$	В	0,467	0,465
5	Напруга на виході підсилувача сигналу, $U_{out}$	В	7,2	7,2

**Висновки.** Застосування селективного приймача випромінювання дало можливість обмежити спектральний діапазон вимірювання потоку випромінювання полум'я спектральною чутливістю приймача випромінювання (довжина хвилі від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м). Застосований в якості приймача випромінювання фотодіод ФД-25К відповідає вимогам: селективний; мало інерційний; має невеликі габарити; можливість роботи при невеликій потужності, що споживається.

Технічні характеристики розробленого оптико-електронного приладу відповідають вимогам, які висуваються до приладу, за допомогою якого виконують вимірювальний контроль витрат кисню газового пальника. А саме: робочий діапазон спектра –  $(0,5 \dots 1,1) \cdot 10^{-6}$  м; діапазон вимірювання напруги на виході підсилувача сигналу –  $0 \dots 7,2$  В; напруга джерела живлення –  $\pm 9$  В; діаметр корпусу давача – 0,035 м; довжина корпусу давача – 0,12 м; габарити електронного блоку: довжина – 0,088 м; ширина – 0,058 м; висота – 0,031 м; маса приладу – 0,27 кг.

## Список використаної літератури:

1. Климков Ю.М. Основы расчёта оптико-электронных приборов с лазерами / Ю.М. Климков. – М. : Сов. радио, 1978. – 264 с.
2. Ночвай В.М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В.М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць ЖДТУ. – 2006. – № 4. – С. 69–76.
3. Поскачей А.А. Оптико-электронные измерения температуры / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
4. Справочник по приёмникам оптического излучения / В.А. Волков, В.К. Вялов, Л.Г. Гассанов и др. ; под. ред. Л.З. Криксунова, Л.С. Кременчугского. – К. : Техніка, 1985. – 216 с.
5. Терещук Р.М. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства : справочник / Р.М. Терещук, К.М. Терещук, С.А. Седов. – 3-е изд., перераб. и доп. – К. : Наукова думка, 1987. – 800 с.
6. Якушенко Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения : учебник / Ю.Г. Якушенко. – М. : Сов. радио, 1977. – 272 с.

## References:

1. Klimkov, Ju.M. (1978), *Osnovy raschjota optiko-jelektronnyh priborov s lazerami*, Sov. radio, Moskva, 264 p.
2. Nochvaj, V.M. (2006), «Doslidzhennja vyprominjuvannja dvofaznogo potoku gaz-tverdi chastyinky», *Procesy mehanichnoi' obrobky v mashynobuduvanni*, zb. nauk. prac' ZhDTU, □No. 4, pp. 69–76.
3. Poskachej, A.A. and Chubarov, E.P. (1988), *Optiko-jelektronnye izmerenija temperatury*, 2<sup>nd</sup> ed., pererab. i dop., Jenergoatomizdat, Moskva, 248 p.
4. Volkov, V.A., Vjalov, V.K., Gassanov, L.G. and others (1985), *Spravochnik po prijomnikom opticheskogo izluchenija*, in Kriksunov, L.Z. and Kremenchugskij, L.S. (ed.), Tehnika, Kiev, 216 p.
5. Tereshhuk, R.M., Tereshhuk, K.M. and Sedov, S.A. (1987), *Poluprovodnikovye priemno-usilitel'nye ustrojstva*, spravochnik, 3<sup>rd</sup> ed., pererab. i dop., Naukova dumka, Kiev, 800 p.
6. Jakushenkov, Ju.G. (1977), *Osnovy optiko-jelektronnoho priborostroenija*, Sov. radio, Moskva, 272 p.

**Ночвай** Володимир Матвійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки і комп'ютерно-інтегрованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- газотермічні покриття;
- прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Тел.: (096) 211–79–41.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2018.