

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ  
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 528.7:629.78

**МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ДИФУЗНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА НА ОСНОВІ  
МАТРИЦІ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИХ ДІОДІВ З РОЗСІЮВАЧЕМ***Міхеєнко Л. А., Калмикова О. В.**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна*

*Метою даної роботи є метрологічний аналіз дифузного випромінювача змінної яскравості на базі матриці світлодіодів з розсіювачем для калібрування прецизійних цифрових відеосистем. Досліджено вплив конструктивних параметрів випромінювача на стабільність поля яскравості на вихідній апертурі. На основі вихідної характеристики було визначено формули коефіцієнтів впливу первинних похибок основних параметрів, розраховано їх значення та проведено їх числовий аналіз. Отримані результати показали, що найбільший вклад в сумарну похибку вносять нестабільність коефіцієнта косинусності світлодіодів та похибка встановлення матриці.*

***Ключові слова:** метрологія, цифрові оптико-електронні системи, оптична радіометрія, матричні приймачі випромінювання.*

**Вступ**

Розробка та вдосконалення прецизійних цифрових відеосистем (ЦВС) з багатоелементними приймачами випромінювання неможливі без випереджаючого розвитку систем вимірювання їх характеристик і калібрування. В першу чергу функції передачі сигналу та нерівномірності чутливості окремих елементів лінійки чи матриці у широкому діапазоні зміни їх опромінення.

Одним із ключових елементів таких систем є дифузний випромінювач (ДВ), який формує на вхідній апертурі ЦВС однорідне, змінне за величиною поле яскравості високої інтенсивності. Здебільшого для цих цілей використовуються ДВ на основі інтегруючої сфери [1, 2], однак такі випромінювачі мають значні габарити, високу вартість та нетехнологічність, тому їх використання обмежено мало- та середньоапертурними ЦВС. В [3] було запропоновано ДВ на основі матриці світловипромінюючих діодів (СВД) з розсіювачем та розглянуто його енергетичні характеристики. Основними перевагами таких випромінювачів є практично необмежена величина вихідної апертури, висока технологічність, низька вартість.

Метою роботи є проведення метрологічного аналізу ДВ на основі матриці СВД з розсіювачем.

**Первинні похибки формування поля яскравості дифузного випромінювача**

Функціональна схема ДВ на основі матриці СВД з розсіювачем представлена на рис.1.

У [3] було отримано формулу залежності яскравості апертури ДВ від його конструктивних параметрів:

$$L_{\text{вих}}(x'', y'') = L_{\text{вих}}(y'') = \frac{\tau_p}{\pi} \int \sum_{n=1}^N \frac{I_0 l^{m+1}}{\left[ \sqrt{l^2 + [y' + (n-1)p]^2} \right]^{m+3}} \sqrt{\frac{-\ln h_t}{\pi}} \cdot \frac{h_t \left( \frac{y'' - y'}{t_p} \right)^2}{t_p} dy',$$

де  $x'', y''$  – координати на поверхні розсіювача;  $y'$  – координати на внутрішній поверхні розсіювача;  $\tau_p$  – коефіцієнт пропускання розсіювача;  $N$  – кількість СВД;  $I_0$  – сила світла в осьовому напрямку;  $l$  – відстань між матрицею та розсіювачем;  $p$  – крок матриці;  $m$  – параметр косинусності;  $h_t$  – функція розсіювання точки (ФРТ) розсіювача;  $t_p$  – півширини лінії розсіювання на рівні  $h_t$ , рівному половині максимального значення функції розсіювання лінії (ФРЛ).

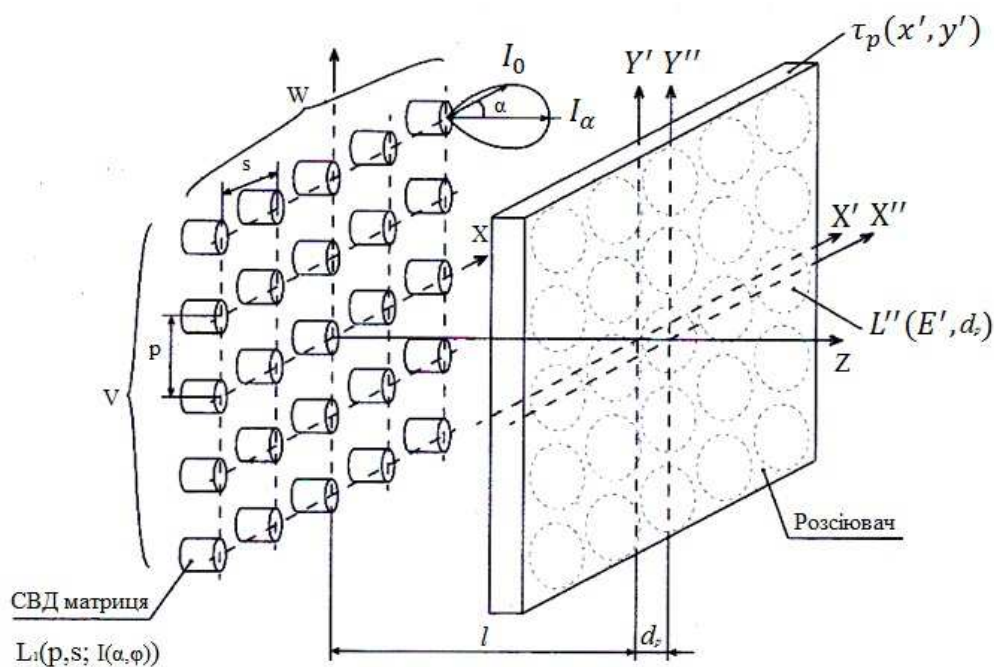


Рис. 1. Схема системи «матриця СВД - розсіювач»

Основні похибки формування поля яскравості на виході ДВ пов'язані з флуктуаціями струму живлення СВД  $\Delta I_{\text{ж}}$  і, як наслідок, змінами сили світла  $I_0$ , змінами коефіцієнта  $m$ , відстанню між матрицею та розсіювачем  $l$  та кроком матриці  $p$ .

Якщо вважати, що ДВ працює у сталому режимі, а фактори, що впливають на яскравість вихідної апертури, статично незалежні, то похибку вихідної яскравості, зумовлену окремими похибками основних факторів –  $\Delta I_0$ ,  $\Delta m$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta p$ , в першому наближенні можна описати таким виразом [4]:

$$\frac{\Delta L_{\text{вих}}}{L_{\text{вих}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{L}_{\text{вих}}}{\partial I_0}\right)^2 \left(\frac{\Delta I_0}{L_{\text{вих}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_{\text{вих}}}{\partial m}\right)^2 \left(\frac{\Delta m}{L_{\text{вих}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_{\text{вих}}}{\partial l}\right)^2 \left(\frac{\Delta l}{L_{\text{вих}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_{\text{вих}}}{\partial p}\right)^2 \left(\frac{\Delta p}{L_{\text{вих}}}\right)^2}$$

Формули для відповідних коефіцієнтів впливу – часткових відносних первинних похибок  $\partial \bar{L}_{\text{вих}}/\partial I_0$ ,  $\partial \bar{L}_{\text{вих}}/\partial m$ ,  $\partial \bar{L}_{\text{вих}}/\partial l$ ,  $\partial \bar{L}_{\text{вих}}/\partial p$  – наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти впливу первісних похибок ДВ.

Джерело похибки	Коефіцієнт впливу (при $y' = 0, y'' = 0$ )	Числове значення
Нестабільність джерела випромінювання, $\Delta I_0$	$\frac{\partial \bar{L}_{\text{вих}}}{\partial I_0} = \frac{l^{m+1} \tau_p}{t_p \pi} \sqrt{\frac{-\ln h_t}{\pi}} \sum_{n=1}^N \frac{1}{(l^2 + (n-1)^2 p^2)^{\left(\frac{m+3}{2}\right)}}$	$-6,7 \times 10^{-8} \text{ м}^2$
Нестабільність коефіцієнта косинусності, $\Delta m$	$\frac{\partial \bar{L}_{\text{вих}}}{\partial m} = \frac{l^{m+1} I_0 \tau_p}{t_p \pi} \sqrt{\frac{-\ln h_t}{\pi}} \cdot \left( \sum_{n=1}^N \frac{\ln(l)}{(l^2 + (n-1)^2 p^2)^{\left(\frac{m+3}{2}\right)}} - \sum_{n=1}^N \frac{\ln(l^2 + (n-1)^2 p^2)}{2(l^2 + (n-1)^2 p^2)^{\left(\frac{m+3}{2}\right)}} \right)$	$1,763 \times 10^3 \text{ кД/м}$
Нестабільність відстані між матрицею та розсіювачем, $\Delta l$	$\frac{\partial \bar{L}_{\text{вих}}}{\partial l} = \frac{l^m I_0 \tau_p}{t_p \pi} \sqrt{\frac{-\ln h_t}{\pi}} \cdot \left( \sum_{n=1}^N \frac{m+1}{(l^2 + (n-1)^2 p^2)^{\left(\frac{m+3}{2}\right)}} - \sum_{n=1}^N \frac{2l^2 \left(\frac{m+3}{2}\right)}{(l^2 + (n-1)^2 p^2)^{\left(\frac{m+5}{2}\right)}} \right)$	$1,288 \times 10^9 \text{ кД/м}^3$
Нестабільність кроку матриці, $\Delta p$	$\frac{\partial \bar{L}_{\text{вих}}}{\partial p} = \frac{l^{m+1} I_0 \tau_p}{t_p \pi} \sqrt{\frac{-\ln h_t}{\pi}} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{2n^2 \left(\frac{m+3}{2}\right)}{(l^2 + (n-1)^2 p^2)^{\left(\frac{m+5}{2}\right)}}$	$0,267 \times 10^1 \text{ кД/м}^4$

### Числовий аналіз похибок дифузного випромінювача

При числовому аналізі сумарної похибки установки яскравості вихідної апертури були використані параметри ДВ, розробленого для калібрування циф-

рових відеосистем: світловий потік  $\Phi = 680$  лм,  $m = 3$ ,  $p = 50$  мм,  $\tau_p = 0,53$ ,  $l = 40$  мм,  $t_p = 0,25$ ,  $h_t = 0,5$ ,  $N = 5$  шт.

Значення коефіцієнтів впливу для вказаних значень параметрів наведено в табл.1, а розраховані залежності похибки установки яскравості вихідної апертури від первинних похибок показано на рис. 2.

Найбільший вклад в сумарну похибку вносять нестабільність коефіцієнта косинусності СВД та похибка встановлення матриці СВД. Похибки відстані між СВД та сили світла менше впливають на сумарну характеристику, але нехтувати ними при прецизійних вимірюваннях не варто. Проаналізуємо вказані похибки більш детально.

Найбільше на оптичні характеристики СВД впливає температура навколишнього середовища і нагрівання кристалу струмом. Існує багато методів температурної стабілізації, корекції випромінюваного потоку. В прецизійних вимірювальних системах в одному корпусі із СВД монтуються: теплопровідні елементи з екранами, що забезпечують добрий тепловий контакт, підтримують температуру на одному рівні [5]; корпуси-тримачі для вимірювання температури джерела випромінювання та її корекції зміною струму живлення [5], а також інші елементи. Ці заходи дають можливість здійснити термостабілізацію випромінювання СВД у межах 0,16—0,2 % [6].

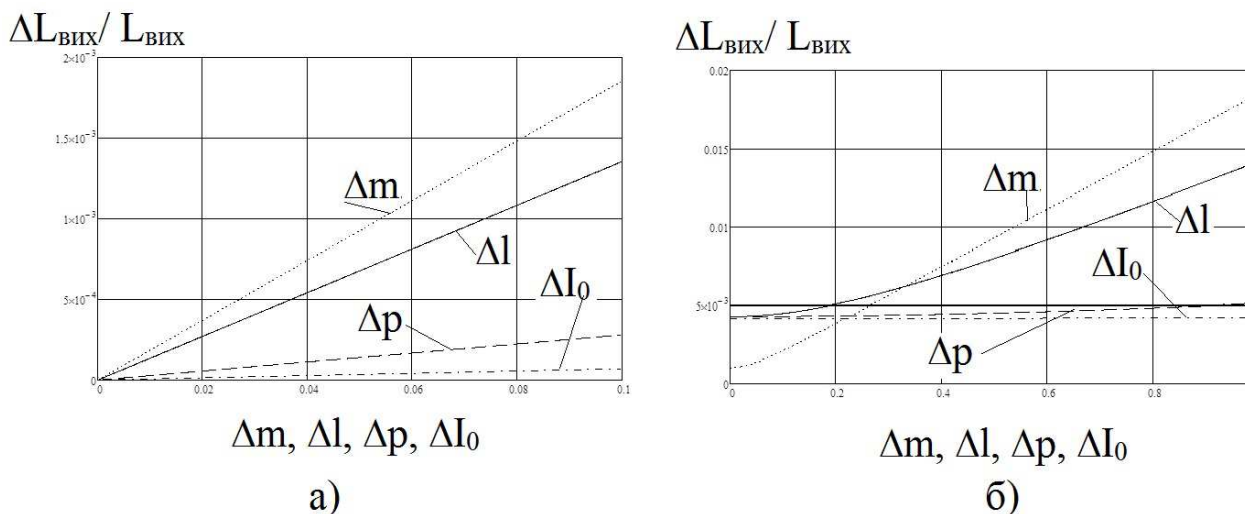


Рис. 2. Залежність похибок установки вихідної яскравості ДВ від первинних похибок основних параметрів – розрахованих (а) та реальних (б)

У масовому виробництві СВД кристали заливають епоксидною смолою, що запобігає відведенню тепла, тому вони практично термоізовані від навколишнього середовища. Нагрівальний елемент може бути лише зовнішнім і передавати тепло через виводи СВД, що мають тепловий контакт з кристалами. Для контролю температури і стабілізації оптичних характеристик може використовуватися пряме зменшення напруги на кристалі. Підтримка потрібного температурного режиму СВД здійснюється за допомогою зовнішніх нагрівальних

елементів. Це дає змогу знизити температурну нестабільність випромінювачів до 1 % [7].

Дуже складним є аналіз залежності форми та орієнтації фотометричного тіла СВД від зовнішніх та внутрішніх чинників – деградації оптичної лінзи, зміни її форми та коефіцієнту пропускання, температури та величини робочого струму тощо. Крім того, ці параметри сильно відрізняються у приладах різних виробників з різною технологією, тому при аналізі було обрано найгірші показники нестабільності фотометричного тіла в межах 0,1 – 0,5%.

Нестабільність джерел живлення СВД також суттєво впливає на сталість оптичних характеристик. При цьому слід зауважити, що нестабільність звичайних лабораторних джерел живлення становить доли відсотка та їх можна використовувати для систем калібрування невисокої точності. Для прецизійних випромінювачів слід використовувати спеціальні високостабільні джерела живлення [8, 9], табл. 2.

Таблиця 2. Високостабільні джерела живлення.

Характеристика	MPS-3005L-1 фірми “MATRIX”	БП40/30-ПУ фірми “ПУЗАНОВ ЭЛЕКТРО- НИКС”	ДЗ6-10-01Ц фірми “Дельта, КП”
Вихідна напруга, В	0–30	0–40	0–36
Вихідний струм, А	0–5,0	0–30	0,2–10
Нестабільність напруги під навантаженням, мВ	±5	±2	±5
Пульсація вихідної напруги не більше, %	±0,003	±0,025	±0,05

Зміна параметрів конструктивних елементів ДВ хоч і є істотним джерелом похибок (рис. 2), але при правильному виборі матеріалу і раціональній конструкції випромінювача може бути доведена до часток відсотка навіть при жорсткому температурному режимі ДВ.

Найбільш стабільним елементом випромінювача є розсіюючий елемент, в якості якого найчастіше використовується молочне або матове кварцове скло. Навіть довготривала нестабільність цих матеріалів не перевищує 0,0005–0,001% [10], а короткотривалою нестабільністю можна взагалі знехтувати.

На рис. 2 показано залежності похибки установки яскравості вихідної апертури  $\Delta L/L$  від первинних похибок основних елементів ДВ із врахуванням їх реальних величин. Для кращого оцінювання можливостей запропонованої моделі

ДВ використано максимальні значення. У цьому випадку максимальна похибка встановлення яскравості не перевищує 0,5 %, що достатньо для розв'язання більшості фотометричних задач.

### **Висновки**

Розглянуто метрологічні характеристики ДВ на основі матриці СВД з розсіюючим елементом і отримано інженерні формули для розрахунку та оцінки як загальної похибки встановлення вихідної яскравості випромінювача, так і похибки його основних елементів.

Основну похибку в стабільності поля яскравості вносить нестабільність СВД, однак застосування високостабільних джерел живлення дає можливість зменшити цю похибку.

Отримані результати становлять інтерес для спеціалістів у галузі оптичної радіометрії і метрології, зокрема для розробників апаратури при вимірюванні енергетичних характеристик прецизійних ЦВС.

Подальші дослідження будуть спрямовані на покращення конструкції ДВ та його метрологічних характеристик.

### **Література**

1. Кисилёв И. А. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ “Ресурс-01” / И. А. Кисилёв, Л. Н. Коростелев, М. К. Караева и др. // Исслед. Земли из космоса. – 1991. – № 2. – С. 34 – 43.
2. Михеенко Л. А. Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер / Л. А. Михеенко, В. Н. Боровицкий // Технология и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. – 2006. – №6 (66). – С. 61 – 64.
3. Михеенко Л. А. Диффузный излучатель переменной яркости на базе матрицы светоизлучающих светодиодов с рассеивателем / Л. А. Михеенко, Т. А. Гришко, Т. В. Котляренко. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 1. – С. 74 – 81.
4. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
5. Заутер Г. Фотометрия светодиодов / Г. Заутер, М. Линдемманн, А. Шперлинг и др. // Светотехника. – 2004. – № 3. – С. 5 – 11.
6. Дежи Д. Эталонный излучатель НИСТ для фотометри светодиодов / Д. Дежи, Ю. Зонг, С. С. Миллер и др. // Светотехника. – № 6. – С. 56 – 59.
7. Бадгутдинов М. Л. Мощные светодиоды белого свечения для освещения / М. Л. Бадгутдинов, Н. А. Гальчина, Л. М. Коган и др. // Светотехника. – 2006. – № 3. – С. 36 – 40.
8. Лабораторные источники питания. – Режим доступа: <http://4452.ua.all-biz.info/>.
9. Мощные высокостабильные источники постоянного тока. – Режим доступа: <http://ps.puzanov.ru/>.
10. Машковская Т. Я. К метрологии белых пластинок / Т. Я. Машковская, В. С. Хазанов, М. А. Шкляева // Светотехника. – 1987. – № 2 – С. 18 – 19.

*Надійшла до редакції  
02 березня 2015 року*

© Михеенко Л. А., Калмикова О. В., 2015