

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання лабораторних і практичних робіт з дисциплін:
«Оптоелектронні пристрої та системи», «Оптоелектронні та акустичні
пристрої і системи», «Оптичні вимірювання» та «Оптоелектронні
вимірювальні пристрої» для студентів денної та заочної форм навчання
усіх спеціальностей**

Покровськ – 2021

УДК 681.7:681.84](072)

М 54

Методичні вказівки до виконання лабораторних та практичних робіт з дисциплін: «Оптоелектронні пристрої та системи», «Оптоелектронні та акустичні пристрої і системи», «Оптичні вимірювання» та «Оптоелектронні вимірювальні пристрої» (для студентів денної та заочної форм навчання усіх спеціальностей) [Електронний ресурс] / уклад. О.В. Вовна, Г.А. Лактіонова. – 2-ге вид., перероб. і допов. – Покровськ : ДонНТУ, 2021. – 52 с.

Методичні вказівки містять основні положення теорії, які використовуються при виконанні лабораторних та практичних робіт, опис методів, порядок виконання, основний зміст звітів, контрольні запитання для самоперевірки знань студентів.

Укладачі: Вовна О.В., д.т.н., професор, зав. кафедри електронної техніки;
Лактіонова Г.А., ас. каф. електронної техніки.

Рецензент: Колларов О.Ю., доц., к.т.н., зав. каф. Ел.Ін.

Відповідальний за випуск: Вовна О.В – професор, д.т.н., завідувач кафедри електронної техніки.

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 2 від 28.09.2021 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електронної техніки,
протокол № 3 від 23.09.2021 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЗАНЯТТЯ № 1. Дослідження спектральної характеристики зору людини-оператору.....	5
ЗАНЯТТЯ № 2. Дослідження процесів інфрачервоного випромінювання твердих тіл.....	14
ЗАНЯТТЯ № 3. Дослідження фотоприймачів.....	29
ЗАНЯТТЯ № 4. Дослідження процесів введення сигналів оптичного випромінювання до оптоелектронної системи.....	34
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	44
ДОДАТОК А Фотоприймальні пристрої.....	45
ДОДАТОК Б Одноелементні об'єктиви для інфрачервоної області спектру фірми «Servo Corporation of America».....	51

ВСТУП

Методичні вказівки розроблені для виконання лабораторних та практичних робіт з дисциплін: «Оптоелектронні пристрої та системи», «Оптоелектронні та акустичні пристрої і системи», «Оптичні вимірювання» та «Оптоелектронні вимірювальні пристрої».

Метою методичних вказівок є набуття студентами практичних навичок моделювання сучасних оптоелектронних систем засобами MathCad.

Кожна з робіт включає наступні етапи виконання: ознайомлення з темою та метою роботи; розгляд та вивчення теоретичної інформації з теми роботи; виконання завдання за варіантом у програмі MathCad; складання звіту з роботи; захист роботи на занятті.

До кожної з робіт викладено наступні пункти: мета роботи, основні, теоретичні відомості, порядок виконання, зміст звіту, контрольні запитання.

Вміст звіту з роботи повинен відповідати відповідному пункту – зміст звіту. Форма складання звіту – електронний варіант документу у програмі Microsoft Word (дистанційне навчання), друкований варіант документу на аркушах розміру А4 (аудиторне навчання).

Згідно з робочою програмою відбувається оцінювання виконання та захист кожної роботи, а також це враховується при виставленні підсумкової оцінки з дисципліни.

ЗАНЯТТЯ №1

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОРУ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРУ

Мета роботи – засвоїти методи апроксимації аналітичними моделями спектральної характеристики зору людини-оператору та отримати практичні навички застосування спектральної характеристики зору для визначення яскравості різних типів індикаторних світловипромінюючих діодів.

1. Підготовка до роботи

1.1. Око людини-оператору розглядається як схематизований фізичний фотоприймач. Спектральну характеристику ока узагальнено та усереднено за численними емпіричними даними у вигляді кривої спектральної світлової ефективності $K_{\lambda}(\lambda)$. У літературних джерелах ця залежність частіше приводиться у вигляді нормованої функції $\nu(\lambda)$ у табличній або графічній формі (табл. 1.1 та рис. 1.1).

Таблиця 1.1 – Значення нормованої функції спектральної світлової ефективності

λ , мкм	$\nu(\lambda)$	λ , мкм	$\nu(\lambda)$	λ , мкм	$\nu(\lambda)$	λ , мкм	$\nu(\lambda)$	λ , мкм	$\nu(\lambda)$
0.38	0.0000	0.46	0.0600	0.54	0.9540	0.62	0.3810	0.70	0.0041
0.39	0.0001	0.47	0.0910	0.55	0.9950	0.63	0.2650	0.71	0.0021
0.40	0.0004	0.48	0.1390	0.56	0.9950	0.64	0.1750	0.72	0.0011
0.41	0.0012	0.49	0.2080	0.57	0.9520	0.65	0.1070	0.73	0.0005
0.42	0.0040	0.50	0.3230	0.58	0.8700	0.66	0.0610	0.74	0.0003
0.43	0.0116	0.51	0.5030	0.59	0.7570	0.67	0.0320	0.75	0.0001
0.44	0.0230	0.52	0.7100	0.60	0.6310	0.68	0.0170	0.76	0.0001
0.45	0.0380	0.53	0.8620	0.61	0.5030	0.69	0.0082	0.77	0.0000
0.45	0.0380	0.53	0.8620	0.61	0.5030	0.69	0.0082	0.77	0.0000

Максимум цієї функції знаходиться $\lambda = 0,555$ мкм та дорівнює $K_{\lambda \max} = 638 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Функція спектральної світлової ефективності із урахуванням введеної нормованої функції описується у наступному вигляді

$$K_{\lambda}(\lambda) = K_{\lambda \max} \cdot v(\lambda).$$

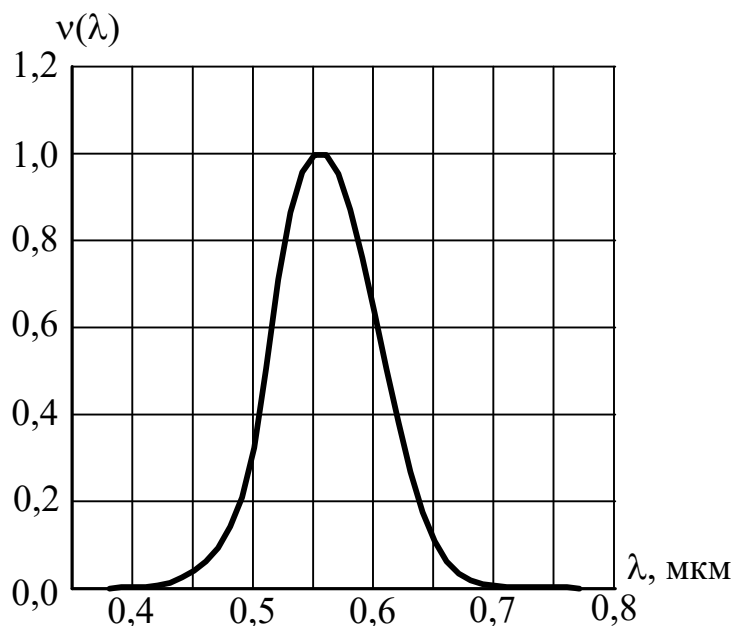


Рисунок 1.1 – Відносна спектральна характеристика ока,
нормована спектральна світлова ефективність

Ця функція має важливе значення оскільки за допомогою її забезпечується зв'язок між однаковими параметрами світлової та енергетичної системами. Так між спектральною густиною потоку ($f_v(\lambda)$ і $f_e(\lambda)$), а також потоками випромінювання (Φ_v, Φ_e) світлової та енергетичної систем зв'язок описується наступним чином:

$$f_v(\lambda) = K_{\lambda \max} \cdot v(\lambda) \cdot f_e(\lambda);$$

$$\Phi_v = K_{\lambda \max} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) \cdot f_e(\lambda) d\lambda; \quad \Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_e(\lambda) d\lambda.$$

Світлова система одиниць оперує із параметрами випромінювання у припущенні, що приймачем випромінювання є око людини, а енергетична система описує процеси формування, передачі та прийому випромінювання у всьому оптичному діапазоні (оптичний діапазон – [1 нм ... 1 мм], видимий діапазон – [0,38 мкм ... 0,78 мкм]) та приймачем випромінювання є технічні засоби. При виконанні інженерних розрахунків використання табличних або графічних даних створює певні труднощі і незручності, які легко долаються при заміні цих даних аналітичними функціями. Тому, однією із перших задач лабораторної роботи є задача аналітичного опису функції нормованої

спектральної світлової ефективності (функція видності).

1.2. Знаходження аналітичного опису функції видності, яку задано у вигляді таблиці, є класичною задачею обчислювальної математики. Рішення подібних роду задач розглядається у розділі апроксимації функцій. Апроксимація може бути виконана функціями певного вигляду або поліномами. Достатньо детально розроблено алгоритми апроксимації широким кругом поліномів: статечними, тригонометричними, Ньютона, Лежандра, Хаара, Уолша, Лагранжа та ін. При виборі поліномів ставляться додаткові вимоги до точності наближення: за критерієм максимального відхилення – поліноми Лагранжа, Ньютона; середньоквадратичного відхилення – метод найменших квадратів із широким кругом поліномів та функцій. Кількість членів у поліномі теж приймає певне значення. Так, наприклад, експериментальні табличні залежності близькі до експоненціальних при апроксимації статечними поліномами із вимогою порівняно високої точності апроксимації вимагають високої степені поліномів (9... 15 степень). Але практично із такою ж точністю ці залежності апроксимуються експоненціальною функцією із двома – трьома параметрами. Пошук рішення в останньому випадку більш короткий та простіший.

При пошуку аналітичного опису функції видності ступінь її наближення до табличного опису слід визначати за критерієм середньоквадратичного відхилення, як і для фізичних фотоприймачів в енергетичній системі одиниць. Вхідною величиною всіх цих фотоприймачів, у тому числі і ока людини, є потік випромінювання, який відноситься до енергетичних параметрів. Середньоквадратичні величини за своїм характером теж є енергетичними. Ця відповідність є основою для вибору критерію наближення.

Графічне зображення функції видності дуже схоже на гаусіану, тому проводити пошук апроксимуючої функції слід у цьому класі функцій. Наприклад, це може бути функція вигляду:

$$\nu_1(\lambda) = e^{-r^2(\lambda - \lambda_0)^2}, \quad (1.1)$$

де r та λ_0 параметри настроювання, оптимальне значення яких забезпечує мінімум середньоквадратичного наближення.

Подібна форма функції забезпечується функцією вигляду:

$$\nu_2(\lambda) = \frac{b^{2 \cdot n}}{(b^2 + (\lambda - \lambda_0)^2)^n}, \quad (1.2)$$

де b , λ_0 та n три параметри настроювання, оптимальне значення яких забезпечує мінімум середньоквадратичного наближення.

Пошук параметрів функцій найкращого наближення у лабораторній роботі повинен бути виконаний методом найменших квадратів (МНК). Для функцій (1.1) та (1.2) застосування цього методу за класичним алгоритмом (рішення рівнянь щодо параметрів) викликає ускладнення у зв'язку з тим, що значення функцій від параметрів залежать нелінійно. Алгоритм перебору значень параметрів та оцінки середньоквадратичного наближення при збереженні ідеї МНК, дозволяє порівняно просто встановити оптимальні значення параметрів. Так для функції двох параметрів $\varphi(x, a, b)$ задача розв'язується наступним чином. Задаються рядом значень параметрів a і b : $a = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ і $b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$. Оскільки початкову залежність представлено у таблиці, то аргумент x теж представлено дискретно $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$. Для кожної пари (a_i, b_j) проводиться пошук значення середньоквадратичного наближення $\varepsilon_{i,j}$:

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y_k - \varphi(x_k, a_i, b_j)]^2. \quad (1.3)$$

Середньоквадратичне наближення ε є функція від двох змінних i та j , яка представляється матрицею вигляду (рис. 1.2.).

	5	6	7
5	$3.752 \cdot 10^{-3}$	$3.662 \cdot 10^{-3}$	$3.673 \cdot 10^{-3}$
6	$2.402 \cdot 10^{-3}$	$2.317 \cdot 10^{-3}$	$2.335 \cdot 10^{-3}$
7	$1.466 \cdot 10^{-3}$	$1.386 \cdot 10^{-3}$	$1.411 \cdot 10^{-3}$
8	$8.916 \cdot 10^{-4}$	$8.175 \cdot 10^{-4}$	$8.509 \cdot 10^{-4}$
9	$6.356 \cdot 10^{-4}$	$5.679 \cdot 10^{-4}$	$6.097 \cdot 10^{-4}$
10	$6.581 \cdot 10^{-4}$	$5.976 \cdot 10^{-4}$	$6.481 \cdot 10^{-4}$
11	$9.249 \cdot 10^{-4}$	$8.719 \cdot 10^{-4}$	$9.314 \cdot 10^{-4}$
12	$1.405 \cdot 10^{-3}$	$1.360 \cdot 10^{-3}$	$1.429 \cdot 10^{-3}$
13	$2.073 \cdot 10^{-3}$	$2.036 \cdot 10^{-3}$	$2.114 \cdot 10^{-3}$

Рисунок 1.2 – Представлення функції середньоквадратичного наближення у вигляді матриці

Визначається мінімальний елемент у цій матриці, за місцем розташування якого встановлюються оптимальні значення a^* і b^* . Точність визначення оптимальних значень параметрів і відповідно точність наближення функцій визначаються вибором значень a_i , b_j . При виборі цих значень із регулярними кроками $\Delta a = a_i - a_{i-1}$ і $\Delta b = b_j - b_{j-1}$ точність апроксимації визначається величинами Δa і Δb . Для підвищення точності вирішення задачі алгоритм розбивають на два етапи. На першому етапі вибирають Δa_1 і Δb_1 достатньо великими та вирішують задачу виявлення області положення мінімуму функції наближення ε . На другому етапі область положення мінімуму сканується із малими значеннями Δa_2 і Δb_2 , причому $\Delta a_2 \ll \Delta a_1$ і $\Delta b_2 \ll \Delta b_1$. Оптимальні значення параметрів встановлюються як і раніше, а точність вирішення задачі виявляється значно вище.

Якщо у вираз апроксимуючої функції (або поліному) параметри входять лінійно, то задача вибору оптимальних параметрів розв'язується по класичному алгоритму МНК. Деякі рекомендації по застосуванню МНК у пакеті прикладних програм Mathcad наведено у файлі «МНК».

1.3. Застосування функції видності. Пристрій відображення інформації побудований на світловипромінюючих діодах (СВД) трьох кольорів: синього, зеленого і червоного. Визначити при якій яскравості синіх і червоних СВД світлодіоди всіх кольорів сприймаються оператором як рівнояскраві, якщо відомі довжини хвиль центрів спектрів випромінювання СВД λ_c , λ_z , λ_q , сила випромінювання зелених СВД I_z . Математичний опис характеристики видності визначено у першій частині роботи. Результати встановити в енергетичній системі одиниць.

Умову рівності яскравості СВД можна представити у вигляді:

$$L_{vc} = L_{vz} = L_{vq}. \quad (1.4)$$

Співвідношення (1.4) можна виразити через силу світла:

$$L_{vc} = \frac{I_{vc}}{A_{свд}} \cdot \cos(\alpha) = \frac{\Phi_{v\ o\ o}}{\Omega \cdot A_{свд}} \cdot \cos(\alpha); \quad \Omega = \frac{A_{o\ o}}{l^2}. \quad (1.5)$$

де L_{vc} – яскравість СВД, яка сприймається оператором; I_{vc} – сила світла, що

поступає до ока оператору; $\Phi_{v\ o\ o}$ – величина потоку, що поступає до ока оператору; $A_{свд}$ – площа поверхні розсіювання індикаторного СВД; Ω – тілесний кут, за яким випромінювання поступає від СВД до вікна зіниці оператора; $A_{o\ o}$ – площа вхідної зіниці ока оператора; l – відстань від СВД до схематизованого фотоприймача – око оператора; α – кут між нормаллю до площини випромінювання СВД і напрямком на центр зіниці ока оператора.

При достатньо великому l (значно більшому лінійних розмірів пристрою відображення інформації) та однаковому конструктивному виконанні СВД різних кольорів матимемо:

$$\Phi_{v\ o\ o} = \varphi(\Phi_{свд}, A_{свд}, A_{o\ o}, \alpha) \quad (1.6)$$

Залежність (1.6) представляється інтегралом по поверхні випромінювання СВД і при постійних перерахованих параметрах дорівнює:

$$\Phi_{v\ o\ o} = k \cdot \Phi_{свд}; \quad (1.7)$$

$$I_{v\ o\ o} = \frac{k \cdot \Phi_{свд}}{2\pi}; \quad (1.8)$$

$$\frac{k \cdot \Phi_{свд} \cdot l^2}{A_{o\ o} \cdot A_{свд}} \cdot \cos(\alpha) = \frac{k \cdot I_{свд} \cdot 2\pi \cdot l^2}{A_{o\ o} \cdot A_{свд}} \cdot \cos(\alpha). \quad (1.9)$$

Опускаючи у пропорції константи та вважаючи, що СВД має нескінченно вузький спектр випромінювання, одержимо:

$$(I_{свд})_c = (I_{свд})_3 = (I_{свд})_q. \quad (1.10)$$

$$(I_{свд})_c \cdot \nu(\lambda) = (I_{свд})_3 \cdot \nu(\lambda) = (I_{свд})_q \cdot \nu(\lambda). \quad (1.11)$$

Звідки визначається сила випромінювання синіх і червоних СВД:

$$(I_{свд})_c = \frac{(I_{свд})_3 \cdot \nu(\lambda_3)}{\nu(\lambda_c)}; \quad (I_{свд})_q = \frac{(I_{свд})_3 \cdot \nu(\lambda_3)}{\nu(\lambda_q)}. \quad (1.12)$$

Одержане рішення, із урахуванням зроблених допущень, слід вважати наближеним, а значним – допущення про ширину спектру випромінювання СВД. Уточнене рішення вимагає додаткових даних. Нормована спектральна густина потоку випромінювання СВД (спектр випромінювання СВД) – $f(\lambda)$ в літературі задається у графічному вигляді та може бути аналітично описана різними функціями, у тому числі і такою, як:

$$\phi_{\text{норм}}(\lambda) = \frac{b^2}{b^2 + (\lambda - \lambda_0)^2}; \quad \Phi_{\text{СВД}} = \phi_0 \cdot \int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda) d\lambda. \quad (1.13)$$

де λ_0 – довжина хвилі максимуму спектру випромінювання СВД; b – напівширина спектру випромінювання на рівні 0,5 (задається у літературі як один із основних параметрів СВД).

Рівність яскравості СВД різних кольорів у цьому випадку приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \phi_{0C} \cdot \int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{0C}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda &= \phi_{03} \cdot \int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{03}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda = \\ &= \phi_{0Ч} \cdot \int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{0Ч}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (1.13)$$

З (1.13) максимальне значення спектральної густини потоку Φ_0 виражається через величину потоку СВД – $\phi_0 = \frac{\Phi_{\text{СВД}}}{b\pi}$, а потік через силу випромінювання $I_{\text{СВД}}$: $\Phi_{\text{СВД}} = 2 \cdot \pi \cdot I_{\text{СВД}}$. Остаточнo одержимо:

$$\begin{aligned} \phi_0 &= \frac{\Phi_{\text{СВД}}}{b\pi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot I_{\text{СВД}}}{b\pi} = \frac{2}{b} I_{\text{СВД}}. \\ \frac{2I_{\text{СВД}C}}{b_C} \cdot \int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{0C}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda &= \frac{2I_{\text{СВД}3}}{b_3} \cdot \int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{03}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda = \\ &= \frac{2I_{\text{СВД}Ч}}{b_Ч} \cdot \int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{0Ч}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$I_{\text{СВД}C} = I_{\text{СВД}3} \frac{b_C}{b_3} \cdot \frac{\int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{03}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{0C}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda};$$

$$I_{\text{СВД ч}} = I_{\text{СВД з}} \frac{b_{\text{ч}}}{b_{\text{з}}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{0\text{з}}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi_{\text{норм}}(\lambda, \lambda_{0\text{ч}}) \cdot \nu(\lambda) d\lambda}. \quad (1.16)$$

2. Порядок виконання роботи

Варіант 1.

1.1. Виконати апроксимацію функції видності, яку задано у вигляді таблиці, аналітичними моделями (1.1) і (1.2). Апроксимацію виконати методом найменших квадратів. В якості аналітичної моделі прийняти яка має мінімальну похибку апроксимації.

1.2. Пристрій відображення інформації побудований на СВД трьох кольорів: синього, зеленого та червоного. Визначити при якій яскравості синіх та червоних СВД світлодіоди усіх кольорів сприймаються оператором як рівнояскраві, якщо відомо довжини хвиль центрів спектрів випромінювання СВД: $\lambda_{\text{с}} = 0,450$ мкм; $\lambda_{\text{з}} = 0,500$ мкм; $\lambda_{\text{ч}} = 0,620$ мкм; сила випромінювання зелених СВД – $I_{\text{з}} = 0,16$ мВт/срад; напівширина спектрів СВД – $\Delta\lambda_{\text{с}} = 0,007$ мкм; $\Delta\lambda_{\text{з}} = 0,010$ мкм; $\Delta\lambda_{\text{ч}} = 0,015$ мкм. Спектральну густину потоку випромінювання СВД описано функцією $\phi(\lambda)$.

$$\phi(\lambda) = \phi_0 \cdot e^{-r^2(\lambda - \lambda_0)^2}.$$

Результати встановити в енергетичній системі одиниць.

Варіант 2.

2.1. Виконати апроксимацію функції видності, яку задано у вигляді таблиці, аналітичною моделлю (1.1) та статечним поліномом. Апроксимацію виконати методом найменших квадратів. В якості аналітичної моделі прийняти яка має мінімальну похибку апроксимації. Степінь поліному не рекомендується приймати більше 15.

2.2. Пристрій відображення інформації побудований на СВД двох кольорів: зеленого та помаранчевого. Визначити при якій яскравості оранжевих СВД світлодіоди всіх кольорів сприймаються оператором як рівнояскраві, якщо відомо довжини хвиль центрів спектрів випромінювання СВД – $\lambda_{\text{з}} = 0,520$ мкм; $\lambda_{\text{п}} = 0,600$ мкм; сила випромінювання зелених СВД – $I_{\text{з}} = 0,08$ мВт/срад; напівширина спектрів СВД – $\Delta\lambda_{\text{з}} = 0,011$ мкм; $\Delta\lambda_{\text{п}} = 0,014$ мкм. Спектральну

густину потоку випромінювання СВД описано функцією $\phi(\lambda)$.

$$\phi(\lambda) = \phi_0 \cdot \frac{b^2}{b^2 + (\lambda - \lambda_0)^2}.$$

Результати встановити в енергетичній системі одиниць.

3. Зміст звіту

3.1. Мета роботи.

3.2. Представлення характеристики видності у табличній формі.

3.3. Апроксимація характеристики видності двома аналітичними функціями.

3.4. Вирішення задачі про знаходження яскравості індикаторних СВД із урахуванням кінцевої ширини спектру СВД. В якості ілюстрації привести графіки підінтегральних функцій (1.16).

3.5. Висновки.

Контрольні запитання

1. Що описується характеристикою видності?

2. У чому різниця між світловою та енергетичною системами одиниць вимірювання параметрів оптичного випромінювання?

3. Що встановлюється максимальним значенням коефіцієнту видності?

4. Чому джерела випромінювання однакової енергетичної потужності та одного конструктивного виконання сприймаються людиною-оператором як нерівнояскраві?

5. Поясніть суть мінімізації у середньоквадратичному значенні вибору параметрів теоретичних функцій, якими апроксимуються експериментальні залежності.

ЗАНЯТТЯ №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Метою роботи – придбання навиків математичного моделювання процесів формування параметрів інформаційних сигналів методами оптоелектроніки при дистанційних способах дослідження та контролю об'єктів.

1. Підготовка до роботи

Розглядається ізотропне інфрачервоне випромінювання від поверхні нагрітого тіла. Спектральна півсферична поверхнева густина потоку m_0 випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ) описується формулою Планка:

$$m_0(\lambda, t) = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_{\text{АЧТ}}(t)}} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.1)$$

де c_1 і c_2 – константи; $c_1 = 3,741832 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{см}^2$, $c_2 = 1,438786 \cdot \text{см} \cdot \text{К}$; $T_{\text{АЧТ}}(t)$ – абсолютна температура, К; t – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Спектральна півсферична поверхнева густина потоку випромінювання реального тіла визначається через спектральну густину АЧТ та, у загальному випадку, селективна півсферична ступінь чорноти реального тіла $\varepsilon(\lambda, T(t))$:

$$m(\lambda, t) = \varepsilon(\lambda, T(t)) \cdot m_0(\lambda, t). \quad (2.2)$$

Напівсферична поверхнева густина потоку випромінювання реального тіла визначається через його спектральну густину:

$$M(t) = \int_0^{\infty} m(\lambda, t) d\lambda. \quad (2.3)$$

Інтенсивність потоку (кутова просторова густина) ($I(t, \phi)$ – відношення поверхневої густини потоку випромінювання у заданому напрямі до величини елементарного тілесного кута, у межах якого розповсюджується випромінювання) у напрямку відмінному від нормалі на кут ϕ для ізотропного

випромінювання пов'язано із півсферичною поверхневою густиною потоку співвідношенням (рис. 2.1):

$$M(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I(t, \phi) d\phi d\theta. \quad (2.4)$$

Інтенсивність потоку ізотропного випромінювання визначається як:

$$I(t, \phi) = I_n(t) \cdot \cos(\phi), \quad (2.5)$$

де $I_n(t)$ – інтенсивність потоку, який направлено по нормалі до випромінюючої поверхні.

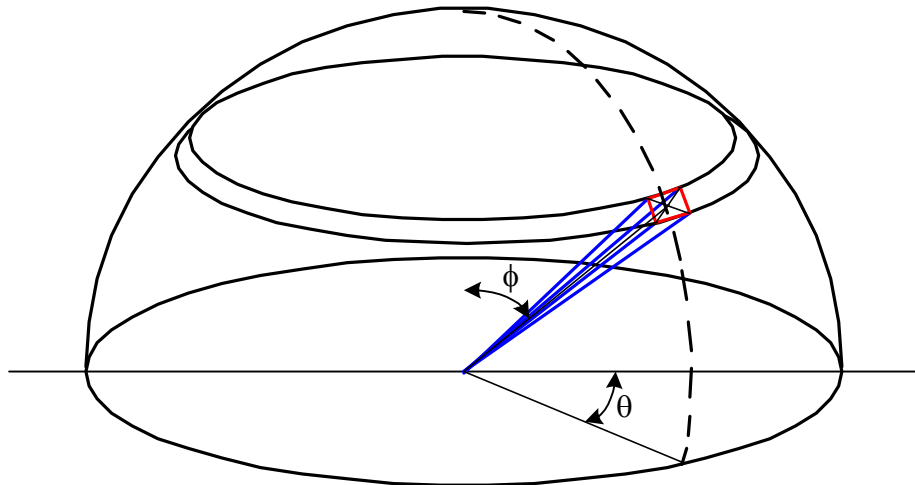


Рисунок 2.1 – Формування напівсферичного потоку елементом поверхні випромінюючого тіла

З формули, що зв'язує півсферичну поверхневу густину потоку випромінювання та інтенсивність потоку ізотропного випромінювання отримаємо:

$$M(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I(t, \phi) d\phi d\theta = I_n(t) \cdot 2\pi; \quad I_n(t) = \frac{M(t)}{2\pi}. \quad (2.6)$$

Для малого тілесного кута Ω інтенсивність потоку ізотропного випромінювання у межах цього кута залишається постійною величиною.

Величину елементарного потоку $d\Phi$, який сформовано елементарним майданчиком dS на випромінюючій поверхні, та розповсюджується під кутом ϕ до нормалі у межах малого тілесного кута Ω , визначимо як:

$$d\Phi = I(t, \phi) \cdot \Omega \cdot dS = \frac{M(t)}{2\pi} \cdot \cos(\phi) \cdot \Omega \cdot dS. \quad (2.7)$$

Останнє співвідношення дозволяє встановити кількісні параметри випромінювання, яке поступає до вхідної зіниці оптоелектронної системи від об'єктів навколишнього середовища. Так для плоскої випромінюючої поверхні площею S величину потоку можна встановити як:

$$\Phi(t) = \oint_S \frac{M(t)}{2\pi} \cdot \cos(\phi) \cdot \Omega \cdot dS. \quad (2.8)$$

Тілесний кут Ω , відповідно до його визначення, встановлюється як відношення площі кульової поверхні, на яку він спирається до квадрата радіусу кулі. Елементарна поверхня dS розміщується у центр кулі. У багатьох практичних випадках при визначенні величини тілесного кута Ω і у зв'язку із його малою кривизною кульової поверхні можна знехтувати. На рис. 2.2 це матиме місце у тому випадку, коли радіус r у багато разів перевищує діаметр зіниці оптичної системи.

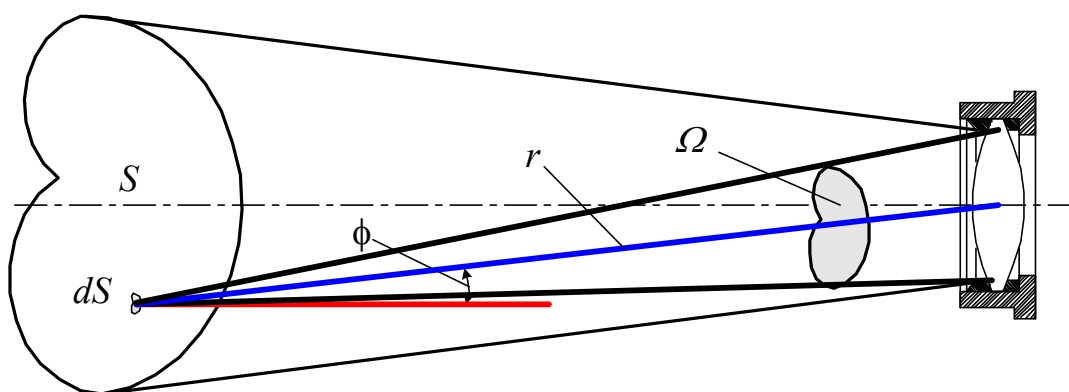


Рисунок 2.2 – Формування потоку елементом поверхні випромінюючого тіла, що потрапляє до зіниці оптичної системи

Приклад. У системі контролю положення слябів на прокатному стані (це також відноситься і до задачі визначення температури слябу) об'єкт контролю –

сталевий сляб, який нагріто до температури $(1000...1400)^{\circ}\text{C}$, є джерелом інфрачервоного випромінювання, яке сприймається фотометричним пристроєм. Потік випромінювання на фотоприймач, який розташовано на відстані l від випромінюючої поверхні сляба, поступає через вікно діафрагми (рис. 2.3).

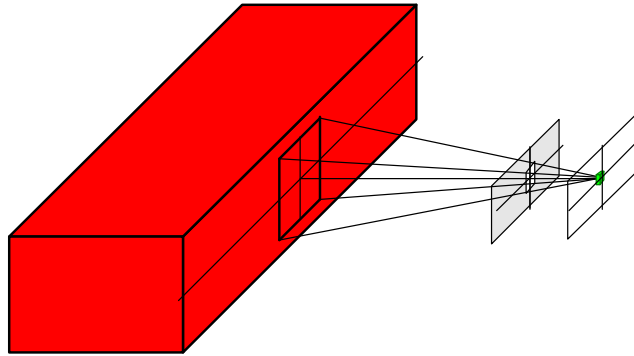


Рисунок 2.3 – Формування інфрачервоного потоку випромінювання, який опромінює фотоприймач

Необхідно визначити величину потоку випромінювання, який поступає до вікна фотоприймача, якщо вікно діафрагми прямокутне із сторонами $a_{дф}$ і $b_{дф}$, вікно фотоприймача теж прямокутне із сторонами $a_{фп}$ і $b_{фп}$, відстань від випромінюючої поверхні до діафрагми l_1 , а від діафрагми до фотоприймача l_2 . Вікна фотоприймача та діафрагми знаходяться на одній осі. Сталевий сляб має виборчу функцію ступеня чорноти $\varepsilon(\lambda, T)$ та у діапазоні температур $(1000...1400)^{\circ}\text{C}$, графік якої наведено на рис. 2.4.

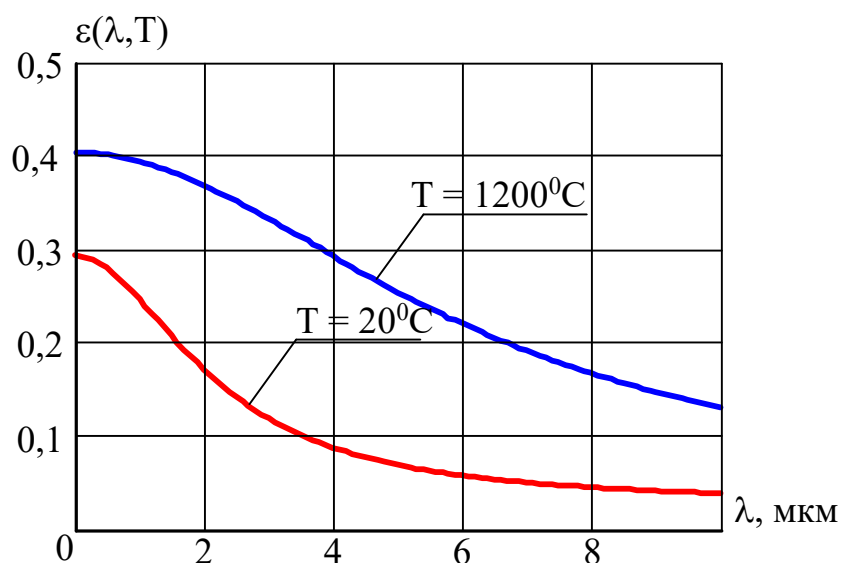


Рисунок 2.4 – Ступінь чорноти необробленої окисленої залізної поверхні при різних температурах

Товщина слябу $d_{\text{сляб}}$. Ділянку освітлено розсіяним сонячним світлом із освітленістю E_{CB} . Оточуючі ділянку предмети утворюють фон із коефіцієнтом віддзеркалення R_{ϕ} та відстанню до фону l_{ϕ} .

Залежність параметрів $\varepsilon\varepsilon 0_{Fe}(T)$ та $bb_{Fe}(T)$ від температури може бути врахована наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} a_{\varepsilon} &= 0,632; & b_{\varepsilon} &= 0,236; & c_{\varepsilon} &= 7; \\ a_{\lambda} &= 2,075; & b_{\lambda} &= 0,102; & c_{\lambda} &= 350; \end{aligned}$$

$$d_{\lambda} = \frac{1}{1200^{15}}; \quad \lambda 0_{Fe} = 0; \quad T = 0,1..1550; \quad T_{00} = 1470; \quad \lambda = 0,0.1..10;$$

$$\varepsilon\varepsilon 0_{Fe}(T) = a_{\varepsilon} + b_{\varepsilon} \cdot a \tan\left(\frac{(T - T_{00}) \cdot c_{\varepsilon}}{T_{00}}\right); \quad (2.9)$$

$$bb_{Fe}(T) = a_{\lambda} + b_{\lambda} \cdot \exp\left(\frac{T}{c_{\lambda}}\right) + d_{\lambda} \cdot T^{15}; \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_{Fe}(\lambda, T) = \varepsilon\varepsilon 0_{Fe}(T) \cdot \frac{(bb_{Fe}(T))^2}{(bb_{Fe}(T))^2 + (\lambda - \lambda 0_{Fe})^2}. \quad (2.11)$$

Параметри сляба мають наступні чисельні значення:

$$\begin{aligned} t_{\text{сляба}} &= 1000...1400; & d_{\text{сляба}} &= 30 \text{ см}; & a_{\text{ДФ}} &= 1 \text{ см}; & b_{\text{ДФ}} &= 1 \text{ см}; \\ l_1 &= 200 \text{ см}; & l_2 &= 2.5 \text{ см}; & a_{\text{ФП}} &= 0.05 \text{ см}; & b_{\text{ФП}} &= 0.05 \text{ см}; \end{aligned}$$

Рішення.

1. Визначаються геометричні розміри області сляба, яка опромінює фотоприймач.

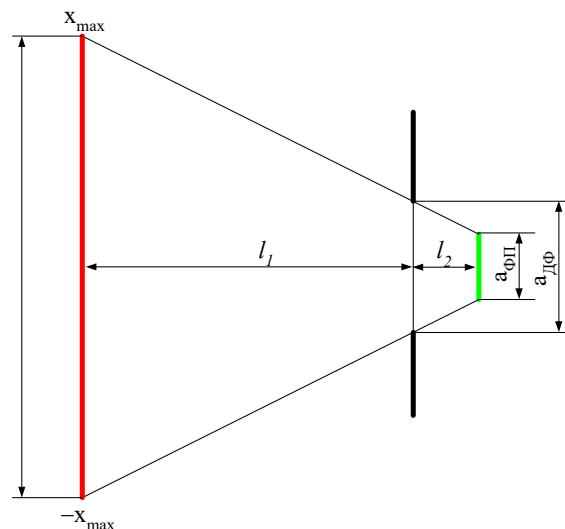


Рисунок 2.5 – Визначення геометричні розміри області сляба, яка опромінює фотоприймач

Із пропорції

$$\frac{\frac{a_{ДФ}}{2} - \frac{a_{ФП}}{2}}{x_{\max} - \frac{a_{ФП}}{2}} = \frac{l_2}{l_1 + l_2} \quad (2.12)$$

визначається ширина опромінюючої зони:

$$x_{\max} = \frac{l_1 \cdot (a_{ДФ} - a_{ФП}) + a_{ДФ} \cdot l_2}{2 \cdot l_2} = \frac{200 \cdot (1 - 0.05) + 1 \cdot 2.5}{2 \cdot 2.5} = 38,5 \text{ см.} \quad (2.13)$$

Аналогічним чином встановлюється другий параметр опромінюючої поверхні:

$$y_{\max} = \frac{l_1 \cdot (b_{ДФ} - b_{ФП}) + b_{ДФ} \cdot l_2}{2 \cdot l_2} = \frac{200 \cdot (1 - 0.05) + 1 \cdot 2.5}{2 \cdot 2.5} = 38,5 \text{ см.} \quad (2.14)$$

Проте товщина сляба $d_{\text{сляба}} = 30 \text{ см}$ і тому $y_{\max} = \frac{d_{\text{сляба}}}{2} = \frac{30}{2} = 15 \text{ см.}$

2. Визначаються параметри випромінювання сляба.

$$m_0(\lambda, t) = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{\text{АЧТ}}(t)}} - 1 \right)^{-1}; \quad m(\lambda, t) = m_0(\lambda, t) \cdot \varepsilon_{Fe}(\lambda, t). \quad (2.15)$$

Результати розрахунків спектральної напівсферичної поверхневої густини потоку випромінювання від АЧТ та реального тіла наведено на рис. 2.6.

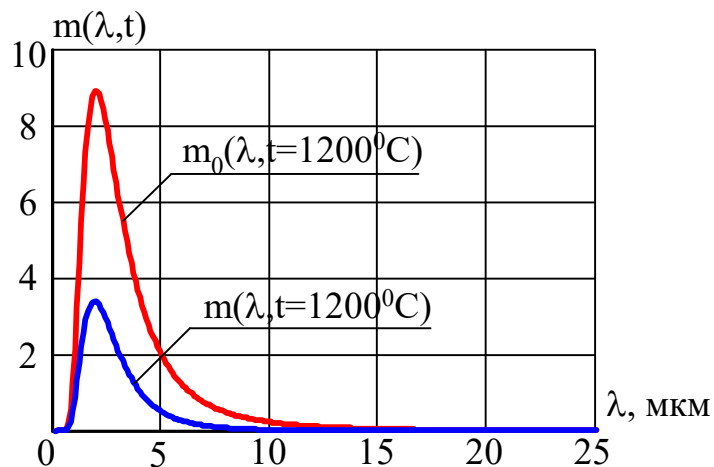


Рисунок 2.6 – Спектральна напівсферична поверхнева густина потоку випромінювання від АЧТ та реального тіла

Інтегральна півсферична густина випромінювання дорівнює:

$$M(t) = \int_0^{25} m(\lambda, t) d\lambda; \quad M(1200) = 8.569 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}. \quad (2.16)$$

Для заданого діапазону розрахована залежність густини випромінювання від температури, графік якої наведено на рис. 2.7.

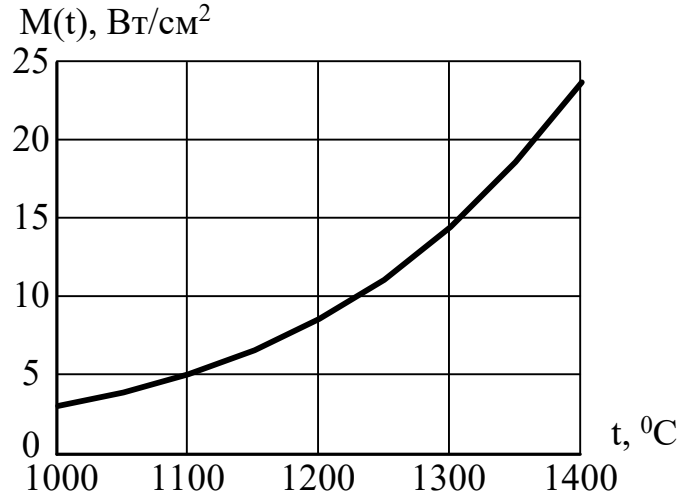


Рисунок 2.7 – Залежність густини випромінювання від температури

3. Визначаються параметри випромінювання, що потрапило до фотоприймача.

Встановлюється величина елементарного потоку $d\Phi$, який формується елементарним майданчиком dS на випромінюючій поверхні та розповсюджується під кутом ϕ за нормаллю у малому тілесному куті Ω :

$$d\Phi = \frac{M(t)}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi) \cdot \Omega \cdot dS; \quad dS = dx \cdot dy; \quad (2.17)$$

При використанні представленого процесу (рис. 2.8) визначають основні параметри:

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2) + (l_1 + l_2)^2}; \quad \Omega = \frac{a_{\Phi\Pi} \cdot b_{\Phi\Pi}}{r^2}; \quad \phi = a \tan\left(\frac{\sqrt{(x^2 + y^2)}}{l_1 + l_2}\right); \quad (2.18)$$

При цьому елементарний потік від dS визначається як:

$$d\Phi = \frac{M(t)}{2 \cdot \pi} \cdot \cos\left(a \tan\left(\frac{\sqrt{(x^2 + y^2)}}{l_1 + l_2}\right)\right) \cdot \frac{a_{\Phi\Pi} \cdot b_{\Phi\Pi}}{(x^2 + y^2) + (l_1 + l_2)^2} \cdot dx \cdot dy. \quad (2.19)$$

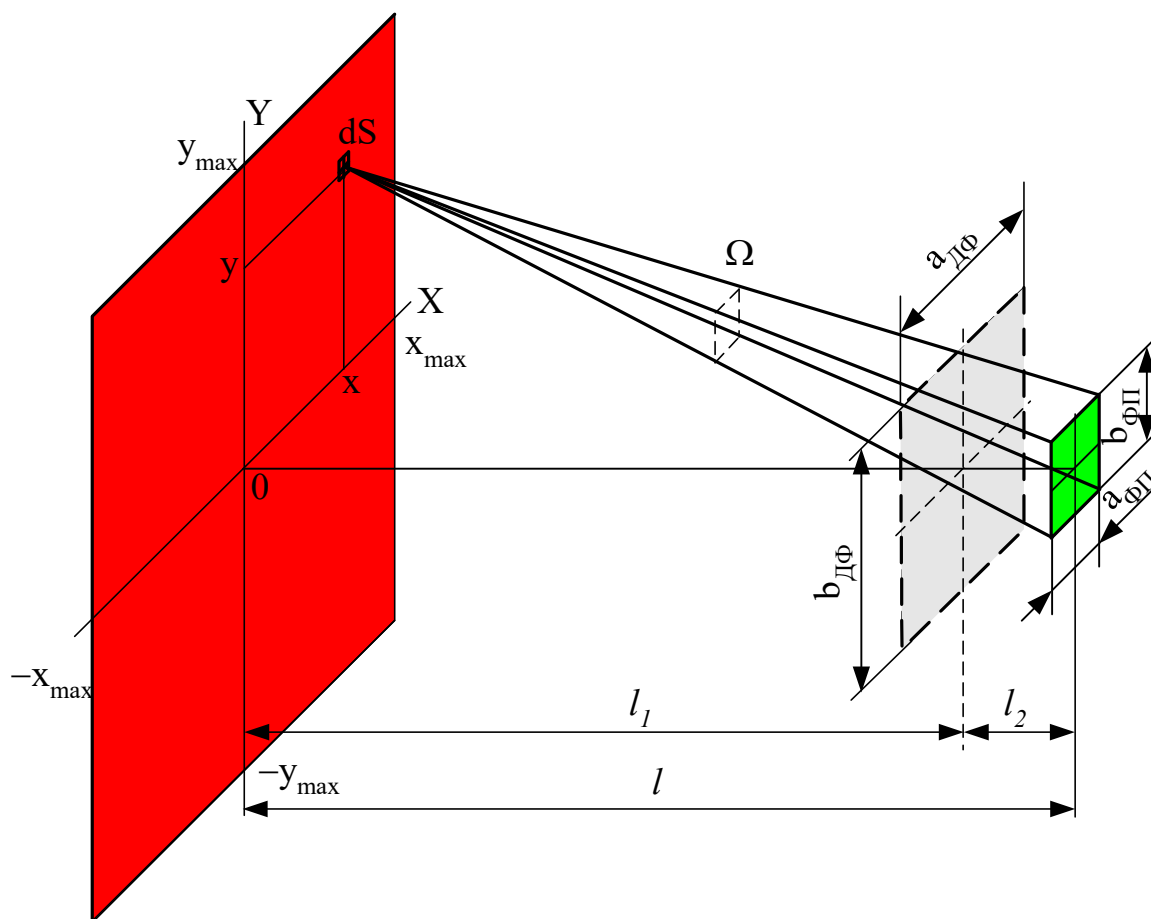


Рисунок 2.8 – Формування потоку, який потрапляє до фотоприймача, елементом поверхні dS випромінюючого тіла

Величина повного потоку від усієї випромінюючої поверхні:

$$\Phi(t) = \frac{M(t)}{2 \cdot \pi} \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} \int_{-y_{\max}}^{y_{\max}} \cos \left(a \tan \left(\frac{\sqrt{(x^2 + y^2)}}{l_1 + l_2} \right) \right) \cdot \frac{a_{\text{ФП}} \cdot b_{\text{ФП}}}{(x^2 + y^2) + (l_1 + l_2)^2} \cdot dy \, dx. \quad (2.20)$$

Використовуючи останню формулу для ряду значень температури із вказаного діапазону, визначається величина потоку:

$$\Phi(1000) = 6.611 \cdot 10^{-5} \text{ Вт};$$

$$\Phi(1100) = 1.116 \cdot 10^{-4} \text{ Вт};$$

$$\Phi(1200) = 1.882 \cdot 10^{-4} \text{ Вт};$$

$$\Phi(1300) = 3.168 \cdot 10^{-4} \text{ Вт};$$

$$\Phi(1400) = 5.200 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

4. Встановлення інформаційних параметрів від випромінювання сляба та фону. Представимо набуті значення потоку та температури у матричній формі, причому значення потоку виразимо у мікроватах.

$$\Phi = \begin{pmatrix} 66.1 \\ 111.6 \\ 188.2 \\ 316.8 \\ 520.0 \end{pmatrix} \text{ мкВт}; \quad T = \begin{pmatrix} 1000 \\ 1100 \\ 1200 \\ 1300 \\ 1400 \end{pmatrix} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отримаємо залежність $T = f(\Phi)$ (рис. 2.9), яка використовується у системі пірометричного вимірювача температури слябу.

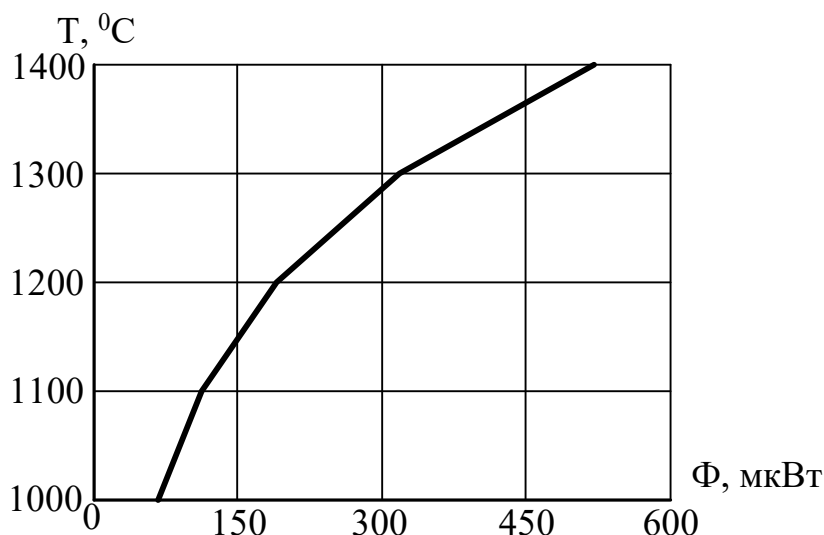


Рисунок 2.9 – Залежність температури розігрітого слябу від потоку випромінювання

Значний контраст між температурами сляба і фону та, відповідно, величинами потоків випромінювання від сляба і фону використовується у системі контролю положення слябу на прокатному стані. Інформаційним параметром у цьому випадку виступає величина перевищення потоку випромінювання від слябу над потоком випромінювання фону, за величиною якого можна визначити чи знаходиться у зоні контролю сляб чи ні. З цією метою визначається випромінювання фону.

Нормована спектральна густина енергетичної освітленості розсіяного сонячного світла має такий же розподіл, що і нормована спектральна густина

випромінювання сонця. Остання описується моделлю АЧТ при температурі 6000°C (рис. 2.10):

$$\varepsilon_{\text{сн норм}}(\lambda) = \frac{m_0(\lambda, 6000)}{m_{0\text{max}}} \quad (2.21)$$

Довжину хвилі та значення максимуму спектральної напівсферичної поверхневої густини потоку випромінювання визначаються як:

$$\begin{aligned} \lambda_m(t) &= \frac{2896}{T_{\text{АЧТ}}(t)}; & \sigma_1 &= 1.2892 \cdot 10^{-15}; & \lambda_m(6000) &= 0.462 \text{ мкм}; \\ m_{0\text{max}}(t) &= \sigma_1 \cdot T_{\text{АЧТ}}(t)^5; & m_{0\text{max}}(t) &= 1.252 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}; \end{aligned} \quad (2.22)$$

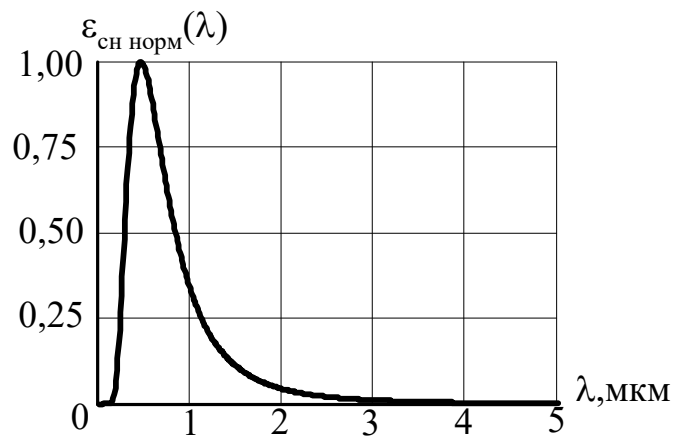


Рисунок 2.10 – Нормована спектральна густина енергетичної освітленості розсіяного сонячного світла

Використовуючи зв'язок між енергетичним та світловим потоками, а також нормуючий допустимий рівень освітленості на ділянці із фотоелектричними засобами вимірювання ($E_{\text{СВФ}} = 20 \text{ лк}$; $R_{\phi} = 0.1$; $K_{\text{max}} = 683 \text{ лм/Вт}$; $r = 16.5 \text{ мкм}^{-1}$; $\lambda_v = 0.555 \text{ мкм}$; $\nu(\lambda) = e^{-r^2(\lambda - \lambda_v)^2}$), визначається максимальне значення спектральної густини освітленості:

$$E_0 = \frac{E_{\text{СВФ}} \cdot 10^{-4}}{K_{\text{max}} \cdot R_{\phi} \cdot \int_{0.1}^{25} \varepsilon_{\text{сн норм}}(\lambda) \cdot \nu(\lambda) d\lambda}; \quad E_0 = 2.97 \cdot 10^{-4}. \quad (2.23)$$

та напівсферичної густини потоку випромінювання фону:

$$M_{ЕК\Phi} = E_0 \cdot R_\Phi \cdot \int_{0.1}^{25} \varepsilon_{сн\,норм}(\lambda) d\lambda; \quad M_{ЕК\Phi} = 2.082 \cdot 10^{-5}. \quad (2.24)$$

З урахуванням відстані до устаткування фонові огорожі (фонових екранів) визначається область фонові поверхні, яка опромінює фотоприймач відображеним світлом (рис. 2.11).

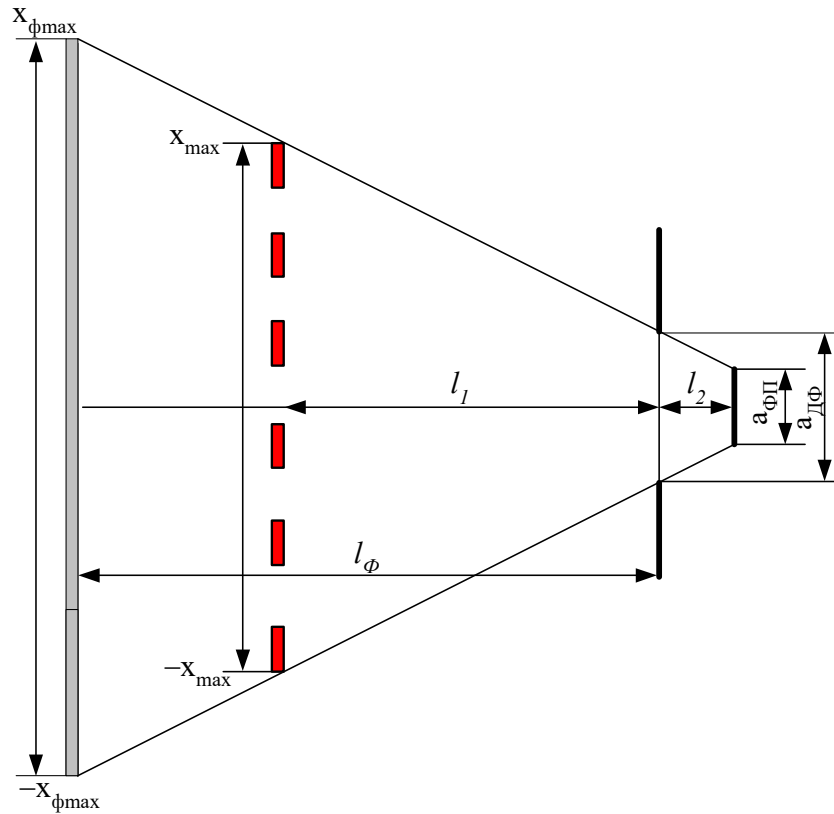


Рисунок 2.11 – Визначення параметрів області фону, яка опромінює фотоприймач

$$x_{\phi\max} = \frac{l_\phi \cdot (a_{ДФ} - a_{ФП}) + a_{ДФ} \cdot l_2}{2 \cdot l_2} = \frac{500 \cdot (1 - 0.05) + 1 \cdot 2.5}{2 \cdot 2.5} = 95.5 \text{ см}; \quad (2.25)$$

$$y_{\phi\max} = \frac{l_\phi \cdot (b_{ДФ} - b_{ФП}) + b_{ДФ} \cdot l_2}{2 \cdot l_2} = \frac{500 \cdot (1 - 0.05) + 1 \cdot 2.5}{2 \cdot 2.5} = 95.5 \text{ см}. \quad (2.26)$$

Величину потоку від фону, який потрапляє у вікно фотоприймача знаходять таким же чином, як і величину потоку від слябу:

$$\Phi_{EK\Phi} = \frac{M_{EK\Phi}}{2 \cdot \pi} \int_{-x_{\phi \max}}^{x_{\phi \max}} \int_{-y_{\phi \max}}^{y_{\phi \max}} \cos \left(a \tan \left(\frac{\sqrt{(x^2 + y^2)}}{l_{\phi} + l_2} \right) \right) \cdot \frac{a_{\phi \Pi} \cdot b_{\phi \Pi}}{(x^2 + y^2) + (l_{\phi} + l_2)^2} \cdot dy \, dx; \quad (2.27)$$

$$\Phi_{EK\Phi} = 1.159 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}; \quad \Phi_{\phi} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ мкВт}.$$

Визначається перевищення потоку випромінювання від слябу над потоком фону (рис. 2.12):

$$h_{\phi_i} = \frac{\Phi \Phi_i}{\Phi_{\phi}}; \quad h_{\phi} = \begin{pmatrix} 5.508 \cdot 10^4 \\ 9.300 \cdot 10^4 \\ 1.568 \cdot 10^5 \\ 2.640 \cdot 10^5 \\ 4.333 \cdot 10^5 \end{pmatrix}; \quad T = \begin{pmatrix} 1000 \\ 1100 \\ 1200 \\ 1300 \\ 1400 \end{pmatrix}. \quad (2.28)$$

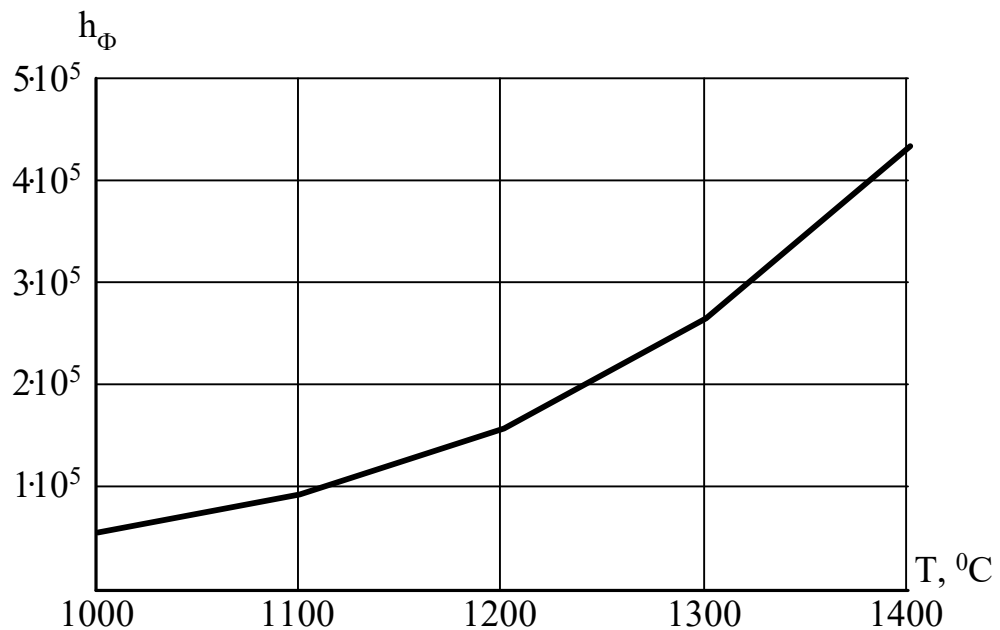


Рисунок 2.12 – Перевищення потоку випромінювання від слябу над потоком фону

Для упевненого розпізнавання положення сляба (об'єкту контролю) достатньо, щоб $h_{\phi} \geq (5 \dots 10)$. При отриманих значеннях параметру задача розпізнавання розв'язується із високою достовірністю.

2. Порядок виконання роботи

1. У системі контролю положення слябів на ділянці розкрою прокатного стану знаходиться об'єкт контролю – сталевий сляб, який нагріто до температури $(800...1100)^{\circ}\text{C}$, він є джерелом інфрачервоного випромінювання. Випромінювання сприймається фотометричним пристроєм. Потік випромінювання на фотоприймач, який розташовано на відстані l від випромінюючої поверхні сляба, поступає через вікно діафрагми (рис. 2.3). Вікно діафрагми прямокутне із сторонами $a_{\text{дф}}$ і $b_{\text{дф}}$, вікно фотоприймача теж прямокутне із сторонами $a_{\text{фп}}$ і $b_{\text{фп}}$, відстань від випромінюючої поверхні до діафрагми l_1 , а від діафрагми до фотоприймача l_2 . Вікна фотоприймача та діафрагми знаходяться на одній осі. Сталевий сляб має виборчу функцію степені чорноти $\varepsilon(\lambda, T)$. Товщина сляба $d_{\text{сляба}}$. Ділянку освітлено розсіяним сонячним світлом з освітленістю $E_{\text{св}}$. Затемнюючі екрани, які оточують ділянку, утворюють фон із коефіцієнтом віддзеркалення $R_{\text{ф}}$ і відстанню до фону $l_{\text{ф}}$.

Встановити:

1) залежність величини h – перевищення потоку випромінювання від слябу над потоком випромінювання фону (відношення сигнал-перешкода), які надходять до фотоприймача, від температури;

2) залежність температури від величини потоку випромінювання, який знаходить у вікно фотоприймача.

$l_1 = 250 \text{ см}; \quad l_2 = 2.5 \text{ см}; \quad l_{\text{ф}} = 400 \text{ см}; \quad a_{\text{фп}} = 1 \text{ мм}; \quad b_{\text{фп}} = 1 \text{ мм}; \quad a_{\text{дф}} = 5 \text{ мм};$
 $b_{\text{дф}} = 5 \text{ мм}; \quad d_{\text{сляба}} = 40 \text{ см}; \quad E_{\text{св}} = 25 \text{ лк}; \quad R_{\text{ф}} = 0.3.$

Аналітичний опис функції видності та її параметри узяти із матеріалів лабораторної роботи «Дослідження спектральної характеристики зору людини-оператору».

2. У системі контролю положення слябів на прокатному стані знаходиться об'єкт контролю – сталевий сляб, нагрітий до температури $(900...1300)^{\circ}\text{C}$, він є джерелом інфрачервоного випромінювання. Випромінювання сприймається фотометричним пристроєм, який є загальним елементом підсистем контролю температури слябу та положення слябу на прокатному стані. Потік випромінювання на фотоприймач, який розташовано на відстані l від випромінюючої поверхні сляба, поступає через вікно діафрагми (рис. 2.3).

Вікно діафрагми прямокутне із сторонами $a_{дф}$ і $b_{дф}$, вікно фотоприймача теж прямокутне із сторонами $a_{фп}$ і $b_{фп}$, відстань від випромінюючої поверхні до діафрагми l_1 , а від діафрагми до фотоприймача l_2 . Вікна фотоприймача та діафрагми знаходяться на одній осі. Сталевий сляб має виборчу функцію степені чорноти $\varepsilon(\lambda, T)$. Товщина сляба $d_{сляба}$. Ділянку освітлено розсіяним сонячним світлом з освітленістю $E_{св}$. Затемнюючі екрани, які оточують ділянку, утворюють фон із коефіцієнтом віддзеркалення R_{ϕ} і відстанню до фону l_{ϕ} .

1) залежність величини h – перевищення потоку випромінювання від слябу над потоком випромінювання фону (відношення сигнал-перешкода), які надходять до фотоприймача, від температури;

2) залежність температури від величини потоку випромінювання, який знаходить у вікно фотоприймача.

$l_1 = 150$ см; $l_2 = 2.0$ см; $l_{\phi} = 300$ см; $a_{фп} = 0.5$ мм; $b_{фп} = 0.5$ мм; $a_{дф} = 5$ мм; $b_{дф} = 2.5$ мм; $d_{сляба} = 50$ см; $E_{св} = 50$ лк; $R_{\phi} = 0.25$.

$l_1 = 150$ см; $l_2 = 2,0$ см; $l_{\phi} = 300$ см; $a_{фп} = 0,5$ мм; $b_{фп} = 0,5$ мм; $a_{дф} = 2,5$ мм; $b_{дф} = 10$ мм; $d_{сляба} = 50$ см; $E_{св} = 50$ лк; $R_{\phi} = 0,25$.

Аналітичний опис функції видності та її параметри узяти із матеріалів лабораторної роботи «Дослідження спектральної характеристики зору людини-оператору»

3. Зміст звіту

1. Мета роботи.

2. Виконання призначеного завдання. Рішення задачі повинне супроводжуватися коментарями, які пояснюють хід рішення. В якості ілюстрацій слід приводити графічні залежності, що одержано при виконанні завдання. Приведення пронумерованих рисунків методичних вказівок як ілюстрації порядку розрахунку не обов'язкове.

3. Висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Яка природа теплового випромінювання?
2. У чому «ідеальність» абсолютно чорного тіла?
3. Чим відрізняється випромінювання реальних тіл від абсолютно чорного тіла?
4. На підставі чого реалізується ідея дистанційного вимірювання температури?
5. Обґрунтуйте можливість виявлення об'єктів, випромінювання яких перевищує випромінювання фону?

ЗАНЯТТЯ № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОПРИЙМАЧІВ

Метою роботи – отримати навички математичного моделювання процесів формування основних параметрів вихідних інформаційних сигналів фотоприймачів та методів їх корекції.

1. Підготовка до роботи

Розглядається процес перетворення інфрачервоного випромінювання, яке формується поверхнею нагрітого тіла та поступає до вікна фотоприймального пристрою, у вихідний електричний сигнал. Опис процесу формування вхідного оптичного сигналу фотоприймача проведено у лабораторній роботі «Дослідження процесів інфрачервоного випромінювання твердих тіл». Вхідними даними при визначенні параметрів вихідного сигналу фотоприймача є параметри сигналу: величина потоку випромінювання, що поступило до вікна фотоприймача, спектральна густина потоку випромінювання, параметри фотоприймача: максимальне значення вхідного потоку випромінювання, інтегральна чутливість, функція нормованої спектральної чутливості, здатність виявлення, температура фотоприймача.

В якості фотоприймача у лабораторній роботі використовуються фотоприймальні пристрої. Ці пристрої призначено для прийому та реєстрації інфрачервоного випромінювання у діапазоні довжин хвиль від 1 до 6,5 мкм. Фотоприймальні пристрої застосовуються у радіометрах та системах фотоелектричної автоматики. Фотоприймальні пристрої є виробами, що містять фоторезистор на основі халькогенідів свинцю із термоелектричним охолоджувачем (до 220 К) та підсилювач фотосигналу, які розміщено у єдиному герметичному металоскляному корпусі. Принципову схему фотоприймальних пристроїв ФУО 611 ... 616 наведено на рис. 1.

Величину вихідного сигналу ФПП, який працює у лінійному режимі $\Phi_{BX} \leq (1.5...2)\Phi_{BHX \max}$, визначається наступним чином:

$$U_{BHX \text{ ФПП}} = \Phi_{BX} \cdot S_{C \text{ INT}}, \quad (3.1)$$

де $S_{C \text{ INT}}$ – інтегральна чутливість ФПП до сигналу.

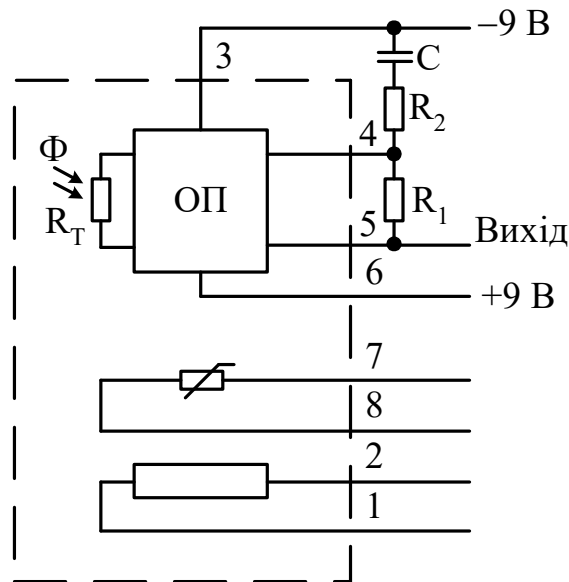


Рисунок 3.1 – Принципова схема фотоприймальних пристроїв
ФУО 611 ... 616

Інтегральна чутливість $S_{C\text{INT}}$ встановлюється із урахуванням спектральних характеристик сигналу та фотоприймача:

$$S_{C\text{INT}} = S_{\text{INT}} \cdot \frac{\int_{\lambda_{1\text{ДЖ ФП}}}^{\lambda_{2\text{ДЖ ФП}}} s_{\text{ДЖ}}(\lambda) \cdot s_{\text{ФП}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{1\text{ФП}}}^{\lambda_{2\text{ФП}}} s_{\text{ФП}}(\lambda) d\lambda}, \quad (3.2)$$

де S_{INT} – інтегральна чутливість фотоприймального пристрою; $s_{\text{ДЖ}}(\lambda)$ – нормована спектральна густина потоку випромінювання джерела вхідного сигналу; $s_{\text{ФП}}(\lambda)$ – нормована спектральна чутливість фотоприймального пристрою; $\lambda_{1\text{ДЖ ФП}}$; $\lambda_{2\text{ДЖ ФП}}$ і $\lambda_{1\text{ФП}}$; $\lambda_{2\text{ФП}}$ – граничні значення довжин хвиль добутку частотних характеристик джерела та фотоприймача, за межами яких добуток дорівнює нулю і граничні значення довжин хвиль частотної характеристики фотоприймача.

Нормована спектральна чутливість фотоприймального пристрою у довідковій літературі задається у вигляді графіку, який наведено на рис. 3.2. Для використання графічно заданої спектральної чутливості в обчисленнях інтегральної чутливості до сигналу її слід описати аналітично. Це можна зробити апроксимувавши цю залежність, наприклад, статечним поліномом.

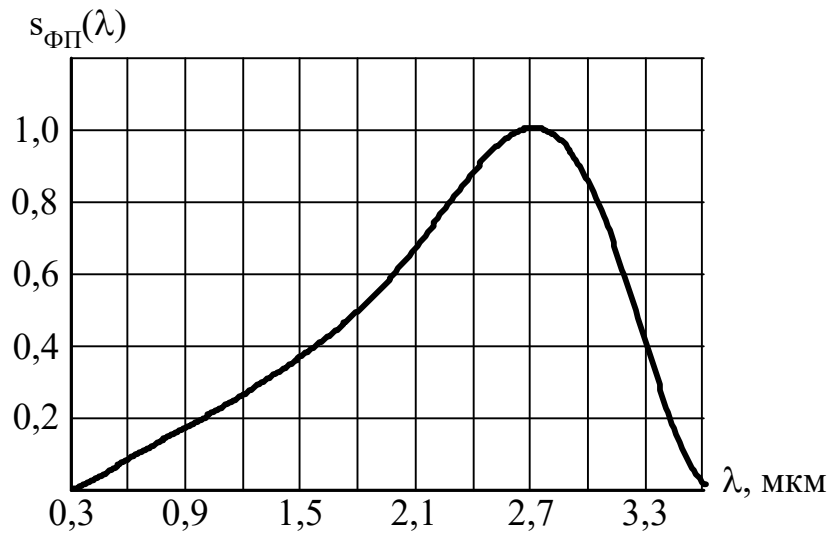


Рисунок 3.2 – Нормована спектральна чутливість
фотоприймального пристрою ФПП – 611

У тих випадках, коли чутливості фотоприймача недостатня, можна підвищити чутливість за рахунок: зменшення кута огляду фотоприймача, охолодження фотоприймача, обмеження смуги пропускання електронного тракту обробки вихідного сигналу фотоприймача. Еквівалентний оптичний шум на вході фотоприймача описується у вигляді трьох складових: зовнішнього оптичного шуму, величина якого визначається тілесним кутом введення випромінювання у фотоприймач, вихідним струмом фотоприймача, який залежить від температури, принципово неусувним шумом вихідного сигналу. При нормальній температурі фотоприймача (20°C), співвідношення між трьома складовими визначаються статистичними коефіцієнтами:

$$k_{\text{ФОНУ}} = 0,675; k_{\text{СТРУМ}} = 0,300; k_{\text{НЕВСУВ}} = 0,025.$$

Еквівалентний потік оптичного шуму із урахуванням відміченого визначається як:

$$\Phi_{\text{ФПш}}(\Omega, t) = \frac{\sqrt{A_{\text{ФП}} \cdot f_{\text{ЕЛ тракту}}}}{D^*} \cdot \left[k_{\text{ФОНУ}} \cdot \frac{\Omega}{\Omega_{\text{max}}} + k_{\text{СТРУМ}} \cdot \Delta_I(t) + k_{\text{НЕВСУВ}} \right], \quad (3.3)$$

де Ω і Ω_{max} – тілесні кути введення випромінювання при обмеженні кута огляду і його максимальне значення, $\Delta_I(t) = 2^{\frac{t-t_0}{b_n}}$ – функція, що описує зміни

струмів оптичного тракту вихідного сигналу фотоприймача, $b_n = 14^\circ\text{C}$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

2. Порядок виконання роботи

1. У системі контролю положення слябів на ділянці розкрою прокатного стану знаходиться об'єкт контролю – сталевий сляб нагрітий до температури $(800 \dots 1100)^\circ\text{C}$, який є джерелом інфрачервоного випромінювання. Випромінювання сприймається фотометричним пристроєм. В якості фотоприймача використовується фотоприймальний пристрій ФУО – 616–5. Встановити залежність величини вихідної напруги фотоприймального пристрою від температури сляба та відношення сигнал/шум при нормальній температурі фотоприймача.

2. На відстані $l_1 = 10$ см від фотометричного пристрою у системі контролю положення слябів поміщена рука людини та здійснюється спроба вимірювання температури тіла людини. Вважаючи, що тіло людини є сірим тілом із ступенем чорноти $\varepsilon = 0,3$ та температурою $t = 37_{-1}^{+3}^\circ\text{C}$, визначити за яких умов (Ω – тілесний кут введення випромінювання, t – температура фотоприймача), можливе вимірювання температури тіла людини. Оцінити приведену похибку вимірювань.

3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Опис спектральної чутливості ФПП аналітичним виразом.
3. Виконання призначеного завдання. Рішення задачі повинне супроводжуватися коментарями, які пояснюють хід рішення. В якості ілюстрації слід приводити графічні залежності, які одержано при виконанні завдання. Приведення пронумерованих рисунків методичних вказівок в якості ілюстрацій не обов'язкове.
4. Висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. У чому полягає явище внутрішнього фотоефекту?
2. Як співвідносяться між собою інтегральна та спектральна чутливості фотоприймача?
3. Дайте визначення параметру «здатність виявлення фотоприймача».

4. Чим відрізняється інтегральна чутливість до сигналу фотоприймача від інтегральної чутливості?

5. Що відрізняє фотоприймальні пристрої від інших типів фотоприймачів?

ЗАНЯТТЯ № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВВЕДЕННЯ СИГНАЛІВ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДО ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи – вивчення методів обліку просторової нерівномірності потоку оптичних сигналів при їх введенні до оптоелектронної системи та формування енергетичних параметрів інформаційних сигналів, що потрапили до оптоелектронної системи.

1. Підготовка до роботи

В якості джерела сигналу розглядається електролюмінісцентне джерело малої протяжності. Просторова нерівномірність потоку оптичних сигналів описується кутовим розподілом потоку випромінювання. Ця характеристика оптичного випромінювання відома так само як сила випромінювання:

$$I(\omega) = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{срад}} \right]. \quad (4.1)$$

Кутова густина випромінювання визначається як відношення величини потоку у заданому напрямі у межах елементарного тілесного кута до величини цього кута. Вважаючи джерело випромінювання точкою із кінцевою величиною півсферичного потоку Φ , повний напівсферичний потік (півсфера описується тілесним кутом в 2π срад, радіус сфери $R = 1$ визначимо як:

$$\Phi = \int_{\Omega} I(\omega) d\omega. \quad (4.2)$$

Джерелом випромінювання формується просторовий потік із круговою симетрією у перпендикулярному перетині та максимумом просторової густини, який знаходиться на подовжньої вісі потоку. Обмежимо область простору від джерела випромінювання уздовж подовжньої вісі розповсюдження потоку поверхнею, на якій просторова густина має значення, що дорівнює половині максимуму просторової густини. Одержана поверхня носить характер тіла

обертання, яка нормована за значенням половини максимуму просторової густини потоку випромінювання, та характеризує спрямованість випромінювання джерела. Контур центрального перетину тіла обертання, що взято уздовж подовжньої осі та нормованого за рівнем половини максимуму просторової густини потоку випромінювання утворює діаграму спрямованості випромінювання джерела. Діаграма спрямованості СВД – функція $\psi(\phi)$ задається одним із параметрів – кутом ϕ відхилення напрямку випромінювання від подовжньої вісі наряду випромінювання. Просторова густина випромінювання аналітично описується у полярній системі координат двома кутами ϕ і β , а також модулем довжини вектору $I(\omega)$. Початок вектору розташовується у центрі просторової полярної системи координат, який співпадає із точковим джерелом випромінювання. Кут ϕ відлічується від подовжньої осі – наряду максимуму випромінювання (осі OZ , яка еквівалентна декартової системи координат; осями OX і OY задається площина, яка виділяє півсферу розповсюдження випромінювання; точкове джерело випромінювання знаходиться у крапці O – центрі декартової та полярної систем координат; перпендикулярні перетини тіла обертання паралелі площині XOY). Кут β відлічується від обраного напрямку відліку другої координати, яка співпадає із віссю OX . Кінець вектору (просторова густина потоку $I(\omega)$) описує поверхню тіла обертання і, оскільки ця функція має кругову симетрію осьових перпендикулярних перетинів, не залежить від кута β . З урахуванням прийнятого, функція просторової густини потоку задається у вигляді:

$$I(\phi) = I_n \cdot \psi(\phi), \quad (4.3)$$

де I_n – максимальне значення просторової густини потоку випромінювання, що знаходиться на подовжній осі наряду випромінювання (осі OZ).

Розглядається задача введення випромінювання від точкового джерела до оптоелектронної системи, входним пристроєм якої є однолінзовий об'єктив (рис. 4.1) діаметром D_{01} . Точкове джерело розташовано у передньому фокусі сферичної лінзи на відстані F_{01} від лінзи. Тілесний кут введення є конусом із вершиною, яка співпадає із точковим джерелом та лінзою, що спирається на круглий центральний перетин. Плоский кут при вершині центрального

перетину конусу $2\alpha_m$.

Схему введення випромінювання від точкового джерела до оптоелектронної системи наведено на рис. 4.2. Виділено довільний напрям променю усередині тілесного кута введення із зсувом щодо головної осі у круглому центральному перетині лінзи на відстані r та кутами ϕ та β . Також показано визначення елементарного майданчика dS , на який спирається елементарний тілесний кут $d\omega$. Величина елементарного тілесного кута визначається як:

$$d\omega = \frac{dS}{R^2}, \quad (4.4)$$

$$\text{де } dS = \frac{d\beta \cdot [(r + dr)^2 - r^2] \cdot \pi}{4 \cdot \pi} = \frac{d\beta \cdot (2 \cdot dr \cdot r + dr^2)}{4} \approx \frac{d\beta \cdot dr \cdot r}{2}.$$

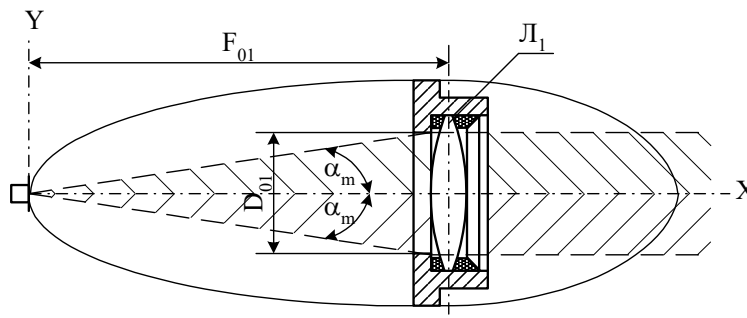


Рисунок 4.1 – Введення випромінювання від точкового джерела до оптоелектронної системи

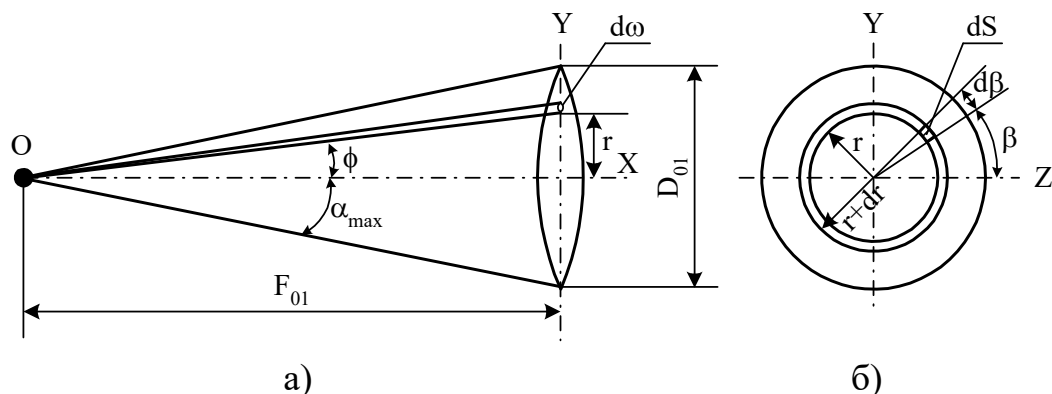


Рисунок 4.2 – Схема введення випромінювання від точкового джерела до оптоелектронної системи

Окремі компоненти наведених співвідношень визначаються наступним чином:

$$r + dr = F_{01} \cdot \operatorname{tg}(\phi + d\phi); \quad R = \frac{F_{01}}{\cos(\phi)}; \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} dr &= F_{01} \cdot \operatorname{tg}(\phi + d\phi) - F_{01} \cdot \operatorname{tg}(\phi) = F_{01} \cdot [\operatorname{tg}(\phi + d\phi) - \operatorname{tg}(\phi)] = \\ &= F_{01} \cdot \frac{\sin(d\phi)}{\cos(\phi + d\phi) \cdot \cos(\phi)} = F_{01} \cdot \frac{d\phi}{\cos^2(\phi)}; \end{aligned} \quad (4.6)$$

Тоді елементарний тілесний кут визначимо як:

$$\begin{aligned} d\omega &= \frac{dS}{R^2} = \frac{\frac{d\beta \cdot dr \cdot r}{2}}{\left(\frac{F_{01}}{\cos(\phi)}\right)^2} = \frac{d\beta \cdot dr \cdot r \cdot \cos^2(\phi)}{2F_{01}^2} = \\ &= \frac{d\beta \cdot \left(F_{01} \cdot \frac{d\phi}{\cos^2(\phi)}\right) \cdot (F_{01} \cdot \operatorname{tg}(\phi)) \cdot \cos^2(\phi)}{2F_{01}^2} = \frac{\operatorname{tg}(\phi)}{2} \cdot d\beta \cdot d\phi. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Врахуємо відмінність тілесного кута, який знаходиться на поверхні сфери радіусом R та на площині центрального перетину лінзи:

$$d\omega = \frac{\operatorname{tg}(\phi) \cdot \cos(\phi)}{2} \cdot d\beta \cdot d\phi = \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\beta \cdot d\phi. \quad (4.8)$$

Повний півсферичний потік від точкового джерела визначається через просторову густину потоку. У сферичній системі координат це встановлюється як:

$$\Phi = \int_{\Omega} I(\omega) d\omega = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} I_n \cdot \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta. \quad (4.9)$$

Для вирішення задачі визначення величини потоку, що потрапив до зіниці оптоелектронної системи, визначається, наприклад, методом найменших квадратів, аналітичний опис діаграми спрямованості $\psi(\phi)$. Функцією $\psi(\phi)$ описується кутовий розподіл потоку випромінювання, що відповідає нормованій діаграмі спрямованості джерела випромінювання. Діаграма спрямованості таких джерел як СВД, описується функцією вигляду:

$$\psi(\phi) = \cos^b(a \cdot \phi). \quad (4.10)$$

Приклад такого опису може мати вигляд:

$$\psi(\phi) = \cos^9(\phi). \quad (4.11)$$

Це дає можливість встановити параметри просторової густини потоку. Вважаючи, що півсферичний потік джерела випромінювання відомий (серед довідкових даних є параметри повного номінального потоку випромінювання СВД), нормальне значення густини потоку визначається із умови:

$$\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_n \cdot \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta = I_n \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta. \quad (4.12)$$

У конкретному випадку, коли $\psi(\phi) = \cos^9(\phi)$, інтеграл по півсферичному куту приймає значення:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^9(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta = \frac{1}{10} \cdot \pi. \quad (4.13)$$

Звідки

$$I_n = \frac{10 \cdot \Phi}{\pi}. \quad (4.14)$$

а просторова густина потоку:

$$I(\phi) = \frac{10 \cdot \Phi}{\pi} \cdot \cos^9(\phi). \quad (4.15)$$

Використовуючи цей опис, а також обмеження $\phi \leq \alpha_{\max}$, визначається величина потоку, що потрапив до зіниці оптоелектронної системи:

$$\Phi_{BX\ OEC} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha_{\max}} I_n \cdot \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta. \quad (4.16)$$

У відносних одиницях, як частина повного півсферичного потоку,

вхідний потік оптоелектронної системи визначається у вигляді коефіцієнта введення:

$$K_{BB} = \frac{\Phi_{BX\ OEC}}{\Phi_{ПОВНИЙ}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha_{\max}} I_n \cdot \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_n \cdot \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta}. \quad (4.17)$$

Ступінь нерівномірності розподіл потоку випромінювання у перетині променя за лінзою об'єктиву встановлюється із аналізу величини просторової густини потоку у центрі лінзи та на її периферії тобто при $r = 0$ та $r = \frac{D_{01}}{2}$.

Приклад. З використанням діаграм спрямованості джерела випромінювання вирішити питання про ефективність введення випромінювання до оптичного пристрою оптоелектронної системи. Джерело випромінювання інфрачервоний світловипромінюючий діод має наступні параметри та характеристики:

- потік випромінювання Φ ;
- нормована діаграма спрямованості $\psi(\phi)$.

Вхідною ланкою оптоелектронної системи є одноелементний об'єктив для інфрачервоної області спектру SCA-IR-6.0 фірми «Servo Corporation of America», який має наступні параметри:

- робочий діапазон довжин хвиль, $\Delta\lambda$, мкм.....від 2,0 до 6,0;
- розрахункова довжина хвилі. λ_0 , мкм.....4,5;
- фокусна відстань, F , мм.....38,1;
- діаметр вхідної зіниці, D , мм..... $F/3$;
- діаметр кола розсіювання, d_p , мм.....0,127;
- товщина лінзи, h , мм.....5;
- коефіцієнт пропускання при λ_0 , T 0,91;
- матеріал лінзи.....сервофакс;
- коефіцієнт заломлення, n_02,41;
- точка плавлення, t , °C210.

Джерело випромінювання розміщене у передньому фокусі об'єктиву. Встановити розподіл потоку випромінювання по перетину променя за лінзою об'єктиву.

$$\Phi = 1 \text{ мВт}; \quad \psi(\phi) = \cos^b(\phi); \quad b = \{1; 9; 47\}. \quad (4.18)$$

Рішення:

1. Визначається кут введення випромінювання до об'єктиву
- 2.

$$\alpha_{\max} = \operatorname{atg}\left(\frac{D_{01}}{2 \cdot F_{01}}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = \operatorname{atg}\left(\frac{\frac{38,1}{3}}{2 \cdot 38,1}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = \operatorname{atg}\left(\frac{1}{6}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = 9,46 \text{ град.} \quad (4.19)$$

2. Визначаються параметри сили випромінювання (кутового розподілу потоку випромінювання)

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta = \frac{1}{10} \cdot \pi; \quad I_n = \frac{10 \cdot \Phi}{\pi}. \quad (4.20)$$

$$I(\phi) = \frac{10 \cdot \Phi}{\pi} \cdot \cos^9(\phi). \quad (4.21)$$

3. Будуються діаграми спрямованості для випадків:

- ($a = 1; b = 1$) – ідеальна діаграма спрямованості індикаторного СВД;
- ($a = 1; b = 9$) діаграма спрямованості робочого СВД для оптоелектронної системи;
- ($a = 1; b = 47$) СВД із поліпшеною діаграма спрямованості для оптоелектронної системи;

$$\begin{aligned} N &= 100; \quad i = 0..N; \quad \Delta\phi = \frac{\pi}{N}; \quad \phi_0 = -\frac{\pi}{2}; \quad \phi_i = \phi_0 + i \cdot \Delta\phi; \\ x1_i &= \sin(\phi_i) \cdot \cos^1(\phi_i); \quad x2_i = \sin(\phi_i) \cdot \cos^9(\phi_i); \quad x3_i = \sin(\phi_i) \cdot \cos^{47}(\phi_i); \\ y1_i &= \cos(\phi_i) \cdot \cos^1(\phi_i); \quad y2_i = \cos(\phi_i) \cdot \cos^9(\phi_i); \quad y3_i = \cos(\phi_i) \cdot \cos^{47}(\phi_i); \end{aligned} \quad (4.22)$$

Графік діаграм спрямованості наведено на рис. 4.3.

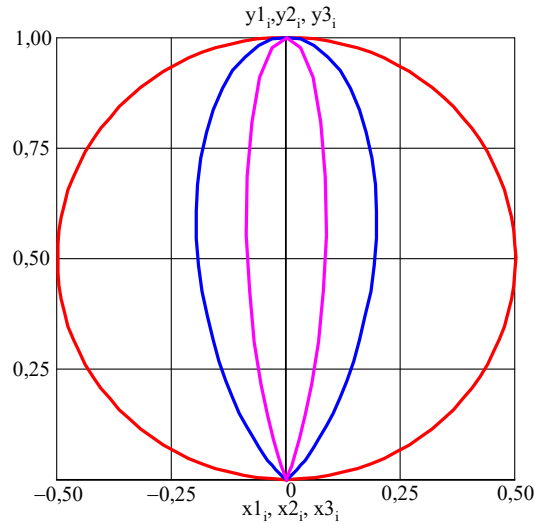


Рисунок 4.3 – Діаграми спрямованості трьох випадків СВД: індикаторного ($a = 1$; $b = 1$); для засобів вимірювання та систем зв'язку ($a = 1$; $b = 9$), для засобів вимірювання та систем зв'язку із поліпшеною діаграмою спрямованості ($a = 1$; $b = 47$)

4. Встановлюється коефіцієнт введення потоку випромінювання до оптоелектронної системи із урахуванням діаграм спрямованості:

$$K_{BB} = \frac{\Phi_{BX\ OEC}}{\Phi_{ПОВНИЙ}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha_{\max}} I_n \cdot \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_n \cdot \psi(\phi) \cdot \frac{\sin(\phi)}{2} \cdot d\phi \cdot d\beta}; \quad K_{BB} = \begin{pmatrix} 0,027 \\ 0,128 \\ 0,482 \end{pmatrix}. \quad (4.23)$$

5. Встановлюється розподіл потоку випромінювання у перетині променя за лінзою об'єктиву:

$$I_{\max} = 20; \quad i = 0 \dots I_{\max}; \quad \Delta D = \frac{D_{01}}{I_{\max}}; \quad D_i = i \cdot \Delta D;$$

$$\phi\phi_i = a \tan \left(\frac{-\frac{D_{01}}{2} + D_i}{F_{01}} \right); \quad JJ_i = J_n \cdot \cos^9(\phi\phi_i); \quad (4.24)$$

обчислюється як:

$$\frac{JJ\left(\frac{D_{01}}{2}\right)}{JJ(0)} = \frac{JJ_0}{JJ_{10}}; \quad \begin{pmatrix} a = 1; b = 1 \\ a = 1; b = 9 \\ a = 1; b = 47 \end{pmatrix}; \quad \frac{JJ_0}{JJ_{10}} = \begin{pmatrix} 0,986 \\ 0,884 \\ 0,525 \end{pmatrix};$$

$$\frac{JJ_0 - JJ_{10}}{JJ_{10}} \cdot 100 \% = \begin{pmatrix} 1,36 \\ 11,6 \\ 47,5 \end{pmatrix}; \quad (4.25)$$

Графік розподілу просторової густини потоку випромінювання уздовж діаметру лінзи для випадку ($a = 1; b = 9$) наведено на рис. 4.4.

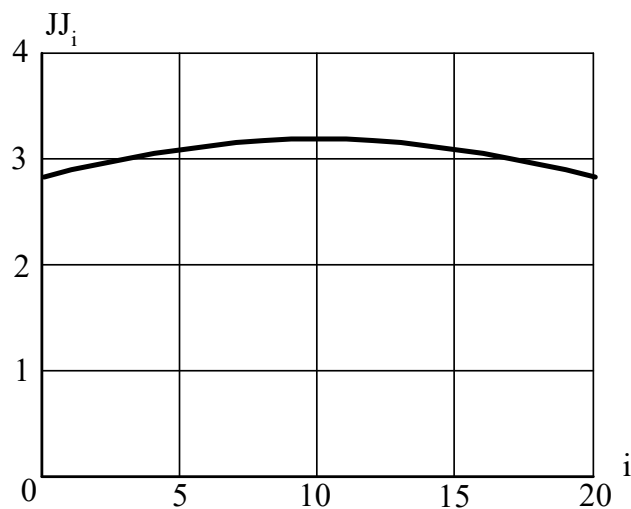


Рисунок 4.4 – Графік розподілу просторової густини потоку випромінювання уздовж діаметру лінзи для випадку ($a = 1; b = 9$)

Якщо ступінь нерівномірності розподілу потоку випромінювання у перетині променя за лінзою об'єктиву великий (перевищує 10 %), в розрахунках слід враховувати нерівномірність потоку або вживати апаратні заходи по вирівнюванню густини потоку уздовж діаметру лінзи (потoku).

2. Порядок виконання роботи

1. Оптичний сигнал вводиться до оптоелектронної системи. Вхідною ланкою системи є одноелементний об'єктив для інфрачервоної області спектру фірми «Servo Corporation of America» (тип об'єктиву індивідуально задається викладачем, номенклатурний ряд об'єктивів наведено у Додатку Б). Джерело випромінювання розміщено у передньому фокусі об'єктиву. Встановити

розподіл потоку випромінювання по перетину променя за лінзою об'єктиву, якщо використовуються СВД із діаграмами спрямованості: 1 – $\psi(\phi) = \cos^3(\phi)$; 2 – $\psi(\phi) = \cos^{13}(\phi)$; 3 – $\psi(\phi) = \cos^{39}(\phi)$. Побудувати графіки діаграм спрямованості, коефіцієнтів нерівномірності густини потоків. Провести аналіз результатів розрахунків.

2. Оптичний сигнал вводиться до оптоелектронної системи. Вхідною ланкою системи є одноелементний об'єктив для інфрачервоної області спектру фірми «Servo Corporation of America» (тип об'єктиву індивідуально задається викладачем, номенклатурний ряд об'єктивів наведено у Додатку Б).

Джерело випромінювання розміщене в передньому фокусі об'єктиву. Встановити розподіл потоку випромінювання по перетину променя за лінзою об'єктиву, якщо використовуються СВД із параметрами діаграм спрямованості: 1 – ($a = 1$; $b = 3$); 2 – ($a = 1$; $b = 15$); 3 – ($a = 1$; $b = 73$). Побудувати графіки діаграм спрямованості, коефіцієнтів нерівномірності густини потоків. Провести аналіз результатів розрахунків.

3. Зміст звіту

1. Мета роботи.

2. Виконання призначеного завдання. Рішення задачі повинне супроводжуватися коментарями, які пояснюють хід рішення. В якості ілюстрацій слід приводити графічні залежності, які одержувані при виконанні завдання. Приведення пронумерованих рисунків методичних вказівок в якості ілюстрацій не обов'язково.

3. Висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Якими конструктивними параметрами джерел випромінювання визначається ступінь спрямованості його випромінювання?

2. Якими параметрами описується ступінь спрямованості випромінювання?

3. Як співвідносяться між собою кутова густина потоку випромінювання та діаграма спрямованості джерела випромінювання?

4. Чи можна за допомогою ідеальної сферичної лінзи сформувати строго паралельний промінь від джерела оптичного випромінювання із кінцевим розміром поверхні?

5. Яким чином враховується частка оптичного потоку, який випромінюється точковим джерелом із нерівномірним кутовим розподілом потоку до зіниці оптоелектронної системи?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ландсберг, Г.С. Оптика : учеб. пособие для вуз. / Г.С. Ландсберг. – 6-е изд., стер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
2. Носов, Ю.Р. Оптоэлектроника / Ю.Р. Носов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 360 с.
3. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптоэлектронных приборов : учеб. для студ. вуз. / Ю.Г. Якушенков . – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Логос, 1999. – 480 с.
4. Аксененко, М.Д. Приемники оптического излучения : справ. / М.Д. Аксененко, М.Л. Бараночников. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.
5. Иванов, В.И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справ. / В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А.М. Юшин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 448 с.
6. Вуколов, Н.И. Знакосинтезирующие индикаторы : справ. / Н.И. Вуколов, А.Н. Михайлов ; [под ред. В.П. Балашова]. – М. : Радио и связь, 1987. – 576 с.
7. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей : учеб. для вуз. / Е.С. Вентцель . – 4-е изд., стер. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
8. Макаров, Е. Инженерные расчеты в Mathcad 14 (+CD) / Е. Макаров. – СПб. : Питер, 2007. – 592 с.
9. Дьяконов, В. МАТНСАД 8/2000 : спец. справ. / В. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2000. – 592 с.

ДОДАТОК А

ФОТОПРИЙМАЛЬНІ ПРИСТРОЇ

ФУО–611, ФУО–612, ФУО–613, ФУО–614, ФУО–615, ФУО–616

Фотоприймальні пристрої призначені для прийому та реєстрації інфрачервоного випромінювання у діапазоні довжин хвиль від 1 до 6,5 мкм. Фотоприймальні пристрої застосовуються у радіометрах та системах фотоелектричної автоматики.

Фотоприймальні пристрої є виробами, що мають у складі фоторезистор на основі халькогенідів свинцю із термоелектричним охолоджувачем (до 220 К) та підсилювач фотосигналу, які розміщено в єдиному герметичному металоскляному корпусі. Кожен тип фотоприймального пристрою має дев'ять модифікацій, відмінних один від одного розмірами фоточутливого майданчика. Вага фотоприймального пристрою не більш 150 гр.

Позначення виводів наведено у табл. А.1.

Основні електричні параметри ФПП:

- напруга живлення підсилювача фотосигналу, В..... 18 ± 3 ;
- струм споживання підсилювачем фотосигналу, мА,.....не більш 30;
- напруга живлення термоелектричного охолоджувача, В.....2;
- струм споживання термоелектричним охолоджувачем, А,.....не більш 3;
- вихідний опір підсилювача фотосигналу, Ом,.....не більш 1000;
- опір ізоляції між виводами та корпусом ФПУ, МОм,.....не менше 100.

Фотоелектричні параметри фотоприймальних пристроїв наведено у табл. А.1.

Габаритні розміри та схему включення ФПП типу: ФУО-611, ФУО-612 ФУО–613, ФУО-614, ФУО-615, ФУО-616 наведено на рис. А.1

Коефіцієнт підсилення операційного підсилювача (ОП).....(1...100)

$$R_2 = \frac{R_1}{K_U}; \quad R_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}.$$

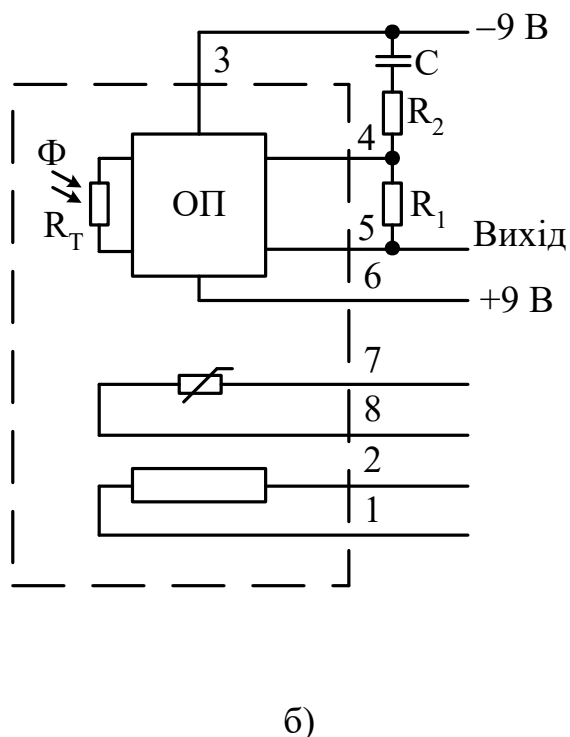
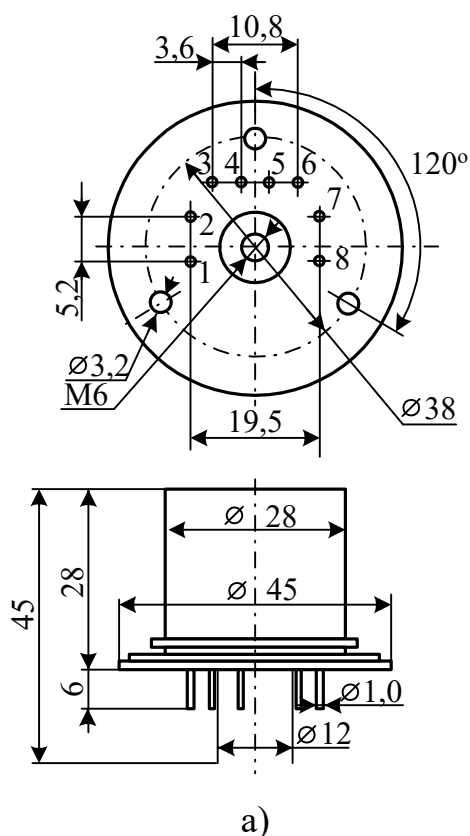


Рисунок А.1 – Габаритні розміри (а) та схему включення ФПП (б) типу: ФУО-611, ФУО-612 ФУО-613, ФУО-614, ФУО-615, ФУО-616

Таблиця А.1 – Призначення виводів ФПП

Вивід	Призначення
1	Мінус термоелектричного охолоджувача
2	Плюс термоелектричного охолоджувача
3	Нуль живлення електронного тракту ФПУ
4	Інвертуючий вхід операційного підсилювача (регулювання коефіцієнту підсилення)
5	Вихід електронного тракту ФПП
6	Плюс живлення електронного тракту ФПП
7,8	Терморезистор
Корпус	Мінус живлення електронного тракту ФПУ

Таблиця А.2 – Фотоелектричні параметри ФПП

Тип фото- приймального пристрою	Розміри фоточутливого елементу, мм	$\Delta\lambda$, мкм	$\lambda_{\max}$, мкм	$S_{U_{iim}}$, В/Вт, не менш	$D^*, \text{Вт}^{-1} \times$ $\Gamma_{\text{ц}}^{1/2} \times \text{см},$ не менш	τ , с не більш
1	2	3	4	5	6	7
ФУО-611-1	0,1 × 0,1	1,0...2,6	2,0±0,2	5·10 ⁵	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-611-2	0,2 × 0,2	1,0...2,6	2,0±0,2	3·10 ⁵	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-611-3	0,3 × 0,3	1,0...2,6	2,0±0,2	1·10 ⁵	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-611-4	0,5 × 0,5	1,0...2,6	2,0±0,2	8·10 ⁵	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-611-5	1,0 × 1,0	1,0...2,6	2,0±0,2	5·10 ⁴	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-611-6	2,0 × 2,0	1,0...2,6	2,0±0,2	3·10 ⁴	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-611-7	3,0 × 3,0	1,0...2,6	2,0±0,2	2·10 ⁴	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-611-8	5,0 × 5,0	1,0...2,6	2,0±0,2	1·10 ⁴	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-611-9	0,5 × 3,0	1,0...2,6	2,0±0,2	2·10 ⁴	5·10 ⁸	1,5·10 ⁻³
ФУО-612-1	0,1 × 0,1	1,0...3,6	2,7±0,2	1·10 ⁶	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-612-2	0,2 × 0,2	1,0...3,6	2,7±0,2	8·10 ⁵	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-612-3	0,3 × 0,3	1,0...3,6	2,7±0,2	6·10 ⁵	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-612-4	0,5 × 0,5	1,0...3,6	2,7±0,2	4·10 ⁵	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-612-5	1,0 × 1,0	1,0...3,6	2,7±0,2	2·10 ⁵	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-612-6	2,0 × 2,0	1,0...3,6	2,7±0,2	5·10 ⁴	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-612-7	3,0 × 3,0	1,0...3,6	2,7±0,2	2·10 ⁴	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-612-8	5,0 × 5,0	1,0...3,6	2,7±0,2	1·10 ⁴	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-612-9	0,5 × 3,0	1,0...3,6	2,7±0,2	1·10 ⁵	3·10 ⁹	5·10 ⁻⁴
ФУО-613-1	0,1 × 0,1	1,0...4,3	3,3±0,2	1·10 ⁶	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-613-2	0,2 × 0,2	1,0...4,3	3,3±0,2	8·10 ⁵	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-613-3	0,3 × 0,3	1,0...4,3	3,3±0,2	6·10 ⁵	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-613-4	0,5 × 0,5	1,0...4,3	3,3±0,2	4·10 ⁵	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-613-5	1,0 × 1,0	1,0...4,3	3,3±0,2	2·10 ⁵	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-613-6	2,0 × 2,0	1,0...4,3	3,3±0,2	5·10 ⁴	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-613-7	3,0 × 3,0	1,0...4,3	3,3±0,2	2·10 ⁴	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-613-8	5,0 × 5,0	1,0...4,3	3,3±0,2	1·10 ⁴	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-613-9	0,5 × 0,3	1,0...4,3	3,3±0,2	1·10 ⁵	4·10 ⁹	2·10 ⁻⁴
ФУО-614-1	0,1 × 0,1	1,0...4,9	3,8±0,2	1·10 ⁶	2,5·10 ⁹	5·10 ⁻⁵
ФУО-614-2	0,2 × 0,2	1,0...4,9	3,8±0,2	5·10 ⁵	2,5·10 ⁹	5·10 ⁻⁵
ФУО-614-3	0,3 × 0,3	1,0...4,9	3,8±0,2	2·10 ⁵	2,5·10 ⁹	5·10 ⁻⁵
ФУО-614-4	0,5 × 0,5	1,0...4,9	3,8±0,2	1·10 ⁵	2,5·10 ⁹	5·10 ⁻⁵
ФУО-614-5	1,0 × 1,0	1,0...4,9	3,8±0,2	1·10 ⁵	2,5·10 ⁹	5·10 ⁻⁵
ФУО-614-6	2,0 × 2,0	1,0...4,9	3,8±0,2	3·10 ⁴	2,5·10 ⁹	5·10 ⁻⁵
ФУО-614-7	3,0 × 3,0	1,0...4,9	3,8±0,2	1·10 ⁴	2,5·10 ⁹	5·10 ⁻⁵
ФУО-614-8	5,0 × 5,0	1,0...4,9	3,8±0,2	1·10 ⁴	2,5·10 ⁹	5·10 ⁻⁵

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4	5	6	7
ФУО-614-9	$0,5 \times 0,3$	1,0...4,9	$3,8 \pm 0,2$	$3 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-1	$0,1 \times 0,1$	1,0...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-2	$0,2 \times 0,2$	1,2...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$5 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-3	$0,3 \times 0,3$	1,2...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$2 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-4	$0,5 \times 0,5$	1,2...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-5	$1,0 \times 1,0$	1,2...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-6	$2,0 \times 2,0$	1,2...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$3 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-7	$3,0 \times 3,0$	1,2...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-8	$5,0 \times 5,0$	1,2...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-615-9	$0,5 \times 3,0$	1,2...5,8	$4,3 \pm 0,3$	$3 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-1	$0,1 \times 0,1$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$5 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-2	$0,2 \times 0,2$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$2 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-3	$0,3 \times 0,3$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-4	$0,5 \times 0,5$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-5	$1,0 \times 1,0$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$3 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-6	$2,0 \times 2,0$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-7	$3,0 \times 3,0$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$1 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-8	$5,0 \times 5,0$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$3 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$
ФУО-616-9	$0,5 \times 3,0$	1,4...6,3	$4,6 \pm 0,3$	$5 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-5}$

Примітки:

1. Інтегральна чутливість $S_{U \text{ INT}}$ задана для коефіцієнту передачі $K_{U \text{ max}} = 100$.

2. Здатність виявлення ФПП визначена для коефіцієнту передачі $K_U = 1$.

3. Величина вихідного сигналу ФПП при інших значеннях коефіцієнту передачі K_U визначається як

$$U_{C \text{ ВИХ ФПП } 100} = S_{C \text{ INT}} \cdot \Phi_{C \text{ ВХ}};$$

$$U_{C \text{ ВИХ ФПП}} = U_{C \text{ ВИХ ФПП } 100} \cdot \frac{K_U}{K_{U \text{ max}}}.$$

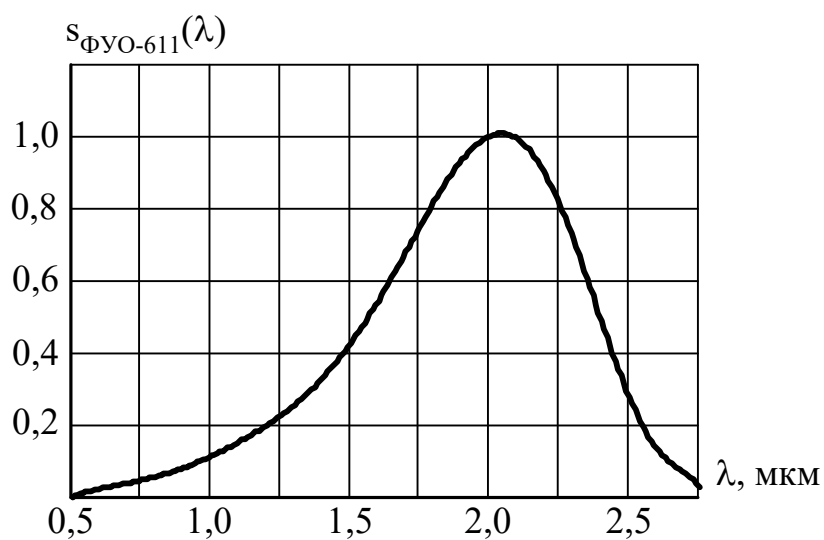
4. Величина вихідного шуму ФПП при інших значеннях коефіцієнту передачі K_U визначається як:

$$U_{Ш \text{ ВИХ ФПП } 1} = S_{Ш \text{ INT}} \cdot \Phi_{Ш \text{ ВХ}};$$

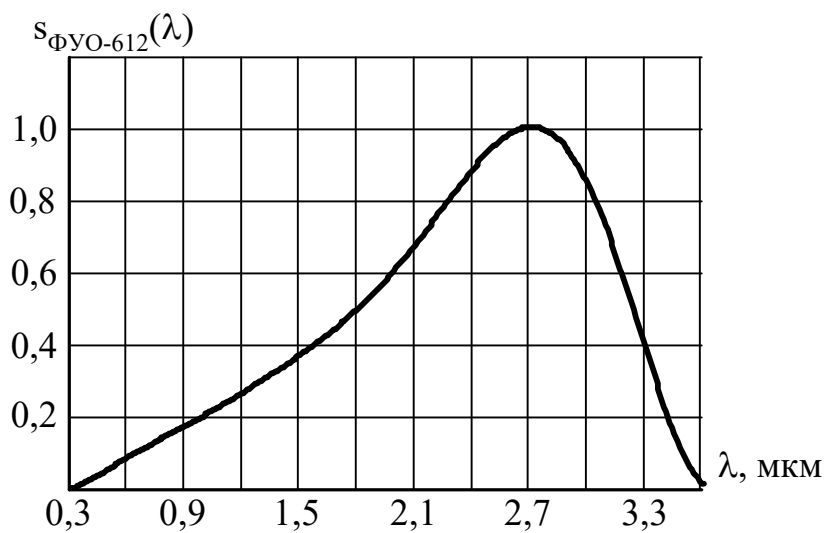
$$U_{Ш \text{ ВИХ ФПП}} = U_{Ш \text{ ВИХ ФПП } 1} \cdot K_U.$$

Відносна спектральна чутливість $s_{\phi_{\text{YO}}}$ фотоприймальних пристроїв

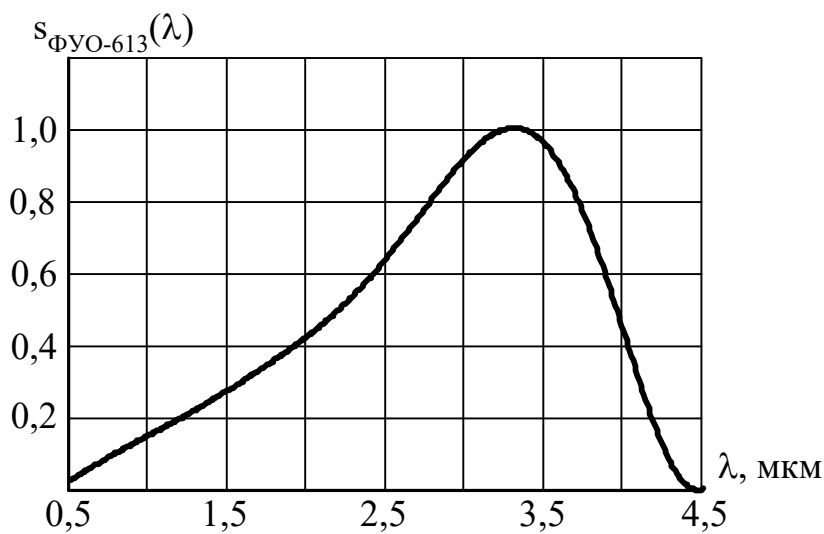
ФУО – 611



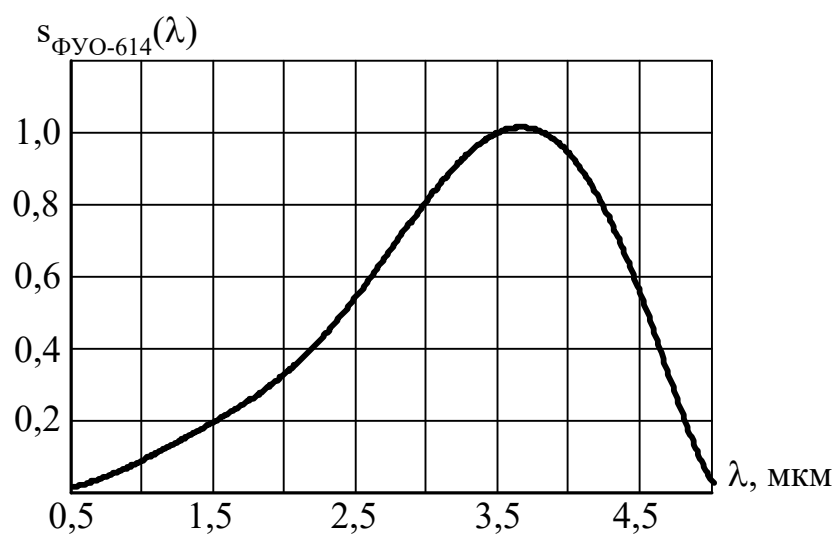
ФУО – 612



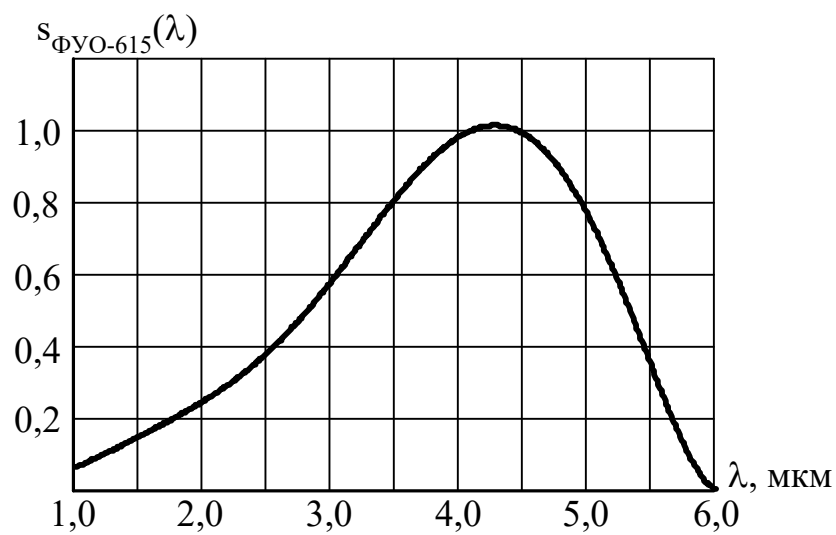
ФУО – 613



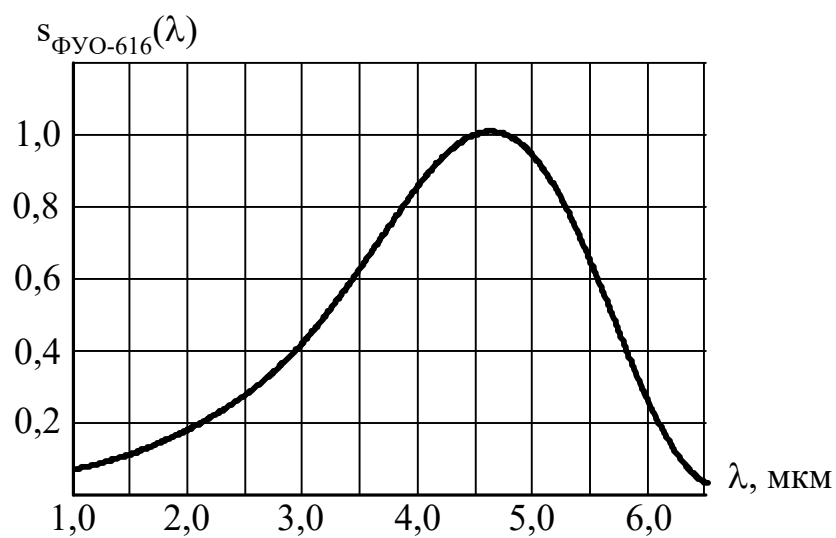
ΦΥΟ – 614



ΦΥΟ – 615



ΦΥΟ – 616



ДОДАТОК Б ОДНОЕЛЕМЕНТНІ ОБ'ЄКТИВИ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ОБЛАСТІ СПЕКТРУ ФІРМИ «SERVO CORPORATION OF AMERICA»

Тип об'єктиву	Робочий діапазон довжин хвиль $\Delta\lambda$, мкм	Розрахункова довжина хвилі λ_0 , мкм	Фокусна відстань, F мм	Відношення $F / D_{об}$	Діаметр розсіювання при λ_0 , d_P , мм	Діаметр розсіювання у межах $\Delta\lambda$, d_P , мм мм	Матеріал
1	2	3	4	5	6	7	8
SCA-IR-1.1-F4-I	0.7–1.5	1.1	101.6	4	0.152	0.279	Плавлений кварц
SCA-IR-1.1-F2			50.8	2	0.610	0.585	
SCA-IR-1.1-F4			101.6	2	1.192	1.390	
SCA-IR-1.4-F2			50.8	2	0.685	0.760	
SCA-IR-1.4-F4-I	0.7–2.0	1.4	101.6	4	1.345	1.520	CaF ₂
SCA-IR-1.4-F4			101.6	2	0.178	0.279	
SCA-IR-1.8-F2			50.8	2	0.558	0.712	
SCA-IR-1.8-F4-I	0.7–3.0	1.8	101.6	4	0.152	0.279	BaF ₂
SCA-IR-1.8-F4			101.6	2	1.116	1.380	
SCA-IR-3.5-F0,75			19.0	1	0.610	0.686	
SCA-IR-3.5-F1,5			38.1	3	0.076	0.127	
SCA-IR-3.5-F2-I			50.8	4	0.0152	0.063	
SCA-IR-3.5-F2			50.8	2	0.127	0.228	
SCA-IR-3.5-F3,6			91.5	1, 2	1.116	1.280	
SCA-IR-3.5-F4-I	2.0–5.0	3.5	101.6	4	0.025	0.127	Сервофракс
SCA-IR-3.5-F4			101.6	2	0.250	0.433	
SCA-IR-3.5-F5,5			139.5	1	4.480	4.810	
SCA-IR-3.5-F8-I			203.2	4	0.063	0.250	
SCA-IR-3.5-F8			203.2	2	0.525	0.940	
SCA-IR-3.5-F9			228.6	3	0.483	0.760	

SCA-IR-6.5-F1,5			38.1	3	0.063	0.127	
SCA-IR-6.5-F2	2–11	6.5	50.8	2	0.076	0.152	Кремній
SCA-IR-6.5-F4			101.6	2	0.152	0.304	
SCA-IR-8-F2			50.8	2	0.127	0.228	
SCA-IR-8-F4	6–10	8	101.6	2	0.250	0.433	Сервофракс
SCA-IR-8-F4-I			101.6	4	0.025	0.152	
SCA-IR-11-F2			50.8	2	0.063	0.076	
SCA-IR-11-F4	6–16	11.0	101.6	2	0.127	0.152	Германій
SCA-IR-11-F4-I			101.6	4	0.0127	0.025	
SCA-IR-4.5-F1.5			50.8	2	0.127	0.228	
SCA-IR-4.5-F1.5	2–6,5	4.5	101.6	2	0.250	0.433	Сервофракс
SCA-IR-4.5-F1.5			101.6	4	0.025	0.127	

