

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання курсової роботи

**«ГАБАРИТНИЙ ТА СВІТЛОЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК  
ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ»**

з навчальної дисципліни

**“ФОТОМЕТРІЯ”**

*(для студентів 3 курсу денної та 4 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології фахового спрямування «Світлотехніка і джерела світла» та за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.*

**Харків**

**ХНУМГ ім. О.М. Бекетова**

**2019**

Методичні рекомендації до виконання курсової роботи «Габаритний та світлоенергетичний розрахунок оптичної системи» з навчальної дисципліни «Фотометрія» (для студентів 3 курсу денної та 4 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології фахового спрямування «Світлотехніка і джерела світла» та за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: С. С. Овчинников, В. М. Поліщук, Г. О. Петченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 44 с.

Укладачі: д-р техн. наук, професор С. С. Овчинников,  
канд. техн. наук, доцент В. М. Поліщук,  
д-р фіз.-мат. наук, професор Г. О. Петченко

Рецензент: М. І. Бойко, доктор технічних наук, професор

*Рекомендовано кафедрою світлотехніки і джерел світла, протокол № 4  
від 6.12.2018.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Розрахунок яскравоміра.....	5
2 Оптична схема яскравоміра.....	7
3 Призначення основних елементів оптичної системи.....	8
4 Вибір приймача випромінення.....	9
4.1 Розрахунок приймача випромінення.....	9
4.2 Перевірка приймача за темновим струмом.....	10
5 Габаритний розрахунок оптичної системи.....	11
5.1 Розрахунок об'єктива яскравоміра.....	11
5.2 Розрахунок польової лінзи.....	11
5.3 Побудова оптичної схеми яскравоміра, ходу осьового та похилого пучка променів.....	13
6 Розрахунок коригуючого фільтра.....	14
7 Розрахунок сталої яскравоміра.....	15
8 Вимоги до оформлення пояснювальної записки.....	17
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	18
ДОДАТКИ.....	19

## ВСТУП

Метою виконання даної курсової роботи є опанування студентами алгоритму розрахунку оптичної системи на підставі знань, отриманих з дисципліни «Основи світлотехніки» з використанням розділів курсу «Фотометрія». У результаті виконання конкретної розрахунково-проектувальної роботи студенти мають набути навички габаритного і світлоенергетичного розрахунку оптичних систем, коригуючих фільтрів і реакції приймача на світловий потік. Ці навички є важливим інструментом для світлотехніка при розробці фотометричної апаратури і знадобляться студентам старших курсів при виконанні лабораторних робіт з дисциплін «Джерела світла», «Світлові прилади», «Освітлювальні установки» тощо, а також при виконанні робіт в рамках НДРС і дипломному проектуванні.

У роботі пропонується виконати розрахунок фотоелектричного яскравоміра (габаритний і світлоенергетичний) за обраним самостійно під конкретну задачу приймачем випромінення і провести розрахунки коригуючого фільтра, реакції приймача, на основі чого запропонувати оптичну схему яскравоміра і його складальне креслення.

### Вихідні дані:

№, варіанта	$L_{\min}, \frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$	$d_{\min}, \text{см}$	$l, \text{см}$	$\alpha$ , ціна ділення приладу, А/ділення

## 1 РОЗРАХУНОК ЯСКРАВОМІРА

Відомо, що яскравість – це одна з найважливіших світлотехнічних величин. За одиницю яскравості ( $\text{кд}/\text{м}^2$ ) прийнято яскравість такої плоскої ділянки поверхні, що у перпендикулярному напрямку випромінює силу світла в одну канделу (1 кд) з  $1 \text{ м}^2$  випромінюючої ділянки поверхні.

Під яскравістю ділянки поверхні в деякому напрямку мається на увазі відношення сили світла, випромінюваною ділянкою поверхні в даному напрямку, до площі проекції цієї ділянки на площину, перпендикулярну до даного напрямку. Математично це можна виразити в такий спосіб:

$$L_{\alpha} = \frac{dL_{\alpha}}{dA \cos \alpha} , \quad (1)$$

де  $L_{\alpha}$  – яскравість ділянки поверхні в напрямку кута випромінювання  $\alpha$ ;

$dA \cos \alpha$  – площа проекції ділянки світної поверхні на площину перпендикулярну даному напрямку.

Таким чином визначення яскравості зводиться до вимірювання сили світла в деякому напрямку і визначенні площі проекції світнього тіла. Цей спосіб завжди є цілком застосовний, якщо джерело світла має кінцеві значення і відтак є можливість визначити площу проекції світнього тіла. Вказана яскравість має назву – габаритна.

У таких випадках, коли розрахунок площі проекції світнього тіла є ускладненим, зазвичай користуються непрямим методом визначення яскравості через освітленість, що створюється досліджуваною ділянкою. Для цього перед досліджуваною ділянкою встановлюють діафрагму з площею отвору  $A_{\text{діаф}}$ . В даному випадку мова йде про локальну яскравість об'єкта.

При цьому яскравість визначається за формулою:

$$L = \frac{E l^2}{A_{\text{діаф}}} . \quad (2)$$

Визначення локальної яскравості також можливо за відомою освітленістю зображення об'єкта. Для цього використовується оптична система, що створює зображення об'єкта на екрані, за яким встановлюється приймач випромінювання. Освітленість зображення пропорційна яскравості об'єкта, а потік, що проходить через отвір в екрані є пропорційним освітленості.

Яскравість пучка променів визначається за співвідношенням:

$$L = \frac{d^2 \Phi}{d^2 G}, \quad (3)$$

де  $d^2 \Phi$  – потік, створений елементарним пучком променів;

$d^2 G$  – міра безлічі елементарного пучка променів.

Зв'язок між яскравістю і потоком має вигляд:

$$\Phi_{min} = GL_{min}. \quad (4)$$

Яскравість пучка променів від випромінюючої поверхні, чисельно дорівнює яскравості поверхні. Треба усвідомлювати, що яскравість є величиною, що відображає сприйняття випромінювання органом зору. Довгий час єдиним приймачем, що дозволяв будувати на його основі прилади для виміру яскравості було око людини. Однак порівняно велика інерційність, низька чутливість і роздільна здатність, стомлюваність спостерігача, а також оперування з великим масивом вимірів не задовольняють сучасним вимогам науки і техніки.

У даний час світлові виміри виконуються за допомогою фізичних приймачів випромінювання.

$$L = \frac{i}{SG}, \quad (5)$$

де  $i$  – реакція приймача випромінювання на потік, що її викликав,  $A$ ;

$S$  – інтегральна чутливість приймача випромінювання,  $\frac{A}{лм}$ ;

$G$  – міра безлічі пучка променів,  $лм^2$ .

## 2 ОПТИЧНА СХЕМА ЯСКРАВОМІРА

У роботі ставиться за мету виконати розрахунок яскравоміра, побудованого за принципом виміру яскравості пучка променів. Оптична схема яскравоміра наведена на рис.1. Оптична схема яскравоміра має забезпечувати надходження на приймач необхідної величини світлового потоку, пропорційного яскравості об'єкта, необхідне збільшення зображення і регламентовані спектральні характеристики оптичної системи приладу.

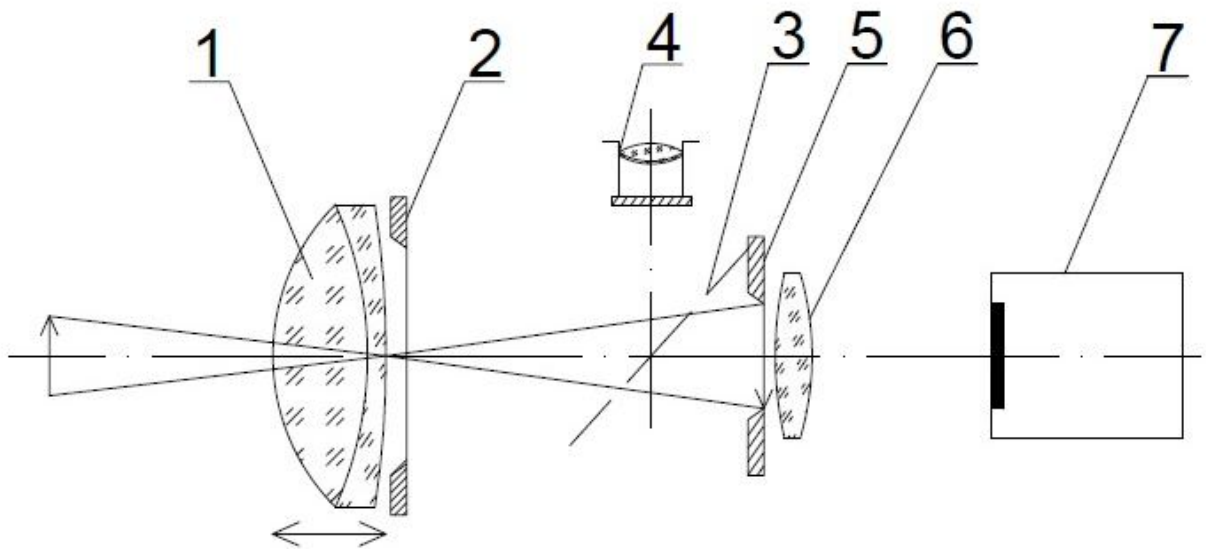


Рисунок 1 – Оптична схема яскравоміра

### 3 ПРИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Елементи оптичної системи призначені для формування необхідної форми пучків променів, направлених на приймач випромінення. При проходженні пучків променів через оптичну систему відбувається їх обмеження елементами оптичних систем, лінзами і спеціально встановленими діафрагмами, елементами конструкцій. Під осьовим пучком променів розуміють пучок, який виходить з точки об'єкта, що розташована на осі оптичної системи.

Фізична діафрагма, що обмежує осьовий пучок променів називається апертурною діафрагмою (2). Об'єктив 1 створює дійсне перевернуте зображення досліджуваної ділянки поверхні А в площині польової діафрагми 5. Польова діафрагма обмежує поле зору даного оптичного приладу і встановлюється в площині зображення об'єкта. Оптична вісь яскравоміра наводиться на досліджувану ділянку поверхні за допомогою візирного пристрою 4, що складається з окуляра, візирної сітки і напівпрозорого дзеркала 3. Нейтральні фільтри служать для захисту ока спостерігача при вимірах великих значень яскравості.

Апертурна діафрагма 2 разом з польовою діафрагмою 5 формує пучок, безліч променів якого не залежить від положення об'єктива. Польова лінза 6 створює зображення апертурної діафрагми на робочій площині приймача випромінення. Нейтральні світлофільтри забезпечують можливість розширення меж виміру. Кольорові світлофільтри служать для виділення вузької області спектра (наприклад, при вимірюванні еквівалентної температури яскравоміром у режимі пірометра), коригуючий фільтр приводить спектральну чутливість приймача до функції  $V(\lambda)$  – нормалізованої функції відносної спектральної світлової ефективності випромінення. Приймач випромінення 7 служить для перетворення випромінення оптичної області спектру в електричний сигнал.



## 4 ВИБІР ПРИЙМАЧА ВИПРОМІНЕННЯ

### 4.1 Розрахунок приймача випромінення

Попередньо приймач випромінювання вибирають за інтегральною чутливістю  $S_{\text{INT}}$ , яка визначається за таким співвідношенням:

$$S_{\text{INT}} = \frac{i_{\text{min}}}{\Phi_{\text{min}}}, \quad (6)$$

де  $\Phi_{\text{min}}$  – мінімальний потік, що надходить на поверхню;

$i_{\text{min}}$  – мінімальний фотострум.

Мінімальний фотострум має складати не менш ніж 30 ділень шкали реєструючого обладнання, за умову, що вся шкала, у більшості випадків, має 100 розподілів:

$$i_{\text{min}} = 30 \alpha. \quad (7)$$

Мінімальний потік, що надходить на приймач випромінення, визначають за мінімальною яскравістю  $L_{\text{min}}$ , що має бути вимірювана цим яскравоміром і мірою безлічі пучка променів  $G$ :

$$\Phi_{\text{min}} = GL_{\text{min}}. \quad (8)$$

Міру безлічі пучка променів визначають за формулою:

$$G = \frac{\pi d_{\text{min}}^2}{4} \cdot \frac{\pi d_{\text{вх.зіні}}^2}{4} \cdot \frac{1}{l^2}, \text{ М}^2, \quad (9)$$

де  $d_{\text{min}}$  – мінімальний діаметр досліджуваної ділянки поверхні;

$l$  – відстань від досліджуваного об'єкта до вхідної зіниці приладу або до апертурної діафрагми;

$d_{\text{вх.зіні}}$  – діаметр вхідної зіниці яскравоміра.

Діаметр вхідної зіниці підбирають емпірично. Зазвичай його приймають  $d_{\text{вх.зіні}} \sim 2 \div 5$  см і при подальшому розрахунку, у разі необхідності, це значення уточнюють.

За значенням інтегральної чутливості  $S_{int}$  обирається приймач випромінення (Додаток Б), причому резерв за чутливістю прилада треба закласти значний, десь  $3 \div 10$  кратний. Інколи, за результатами розрахунку виникає необхідність переглянути вибраний приймач випромінення.

#### **4.2 Перевірка приймача за темновим струмом**

Обраний приймач випромінення перевіряють за темновим струмом.

При цьому величина темнового струму повинна задовольняти умові:

$$i_t(3 \div 10) < i_{min}. \quad (10)$$

При виборі приймача випромінення необхідно підбирати такий приймач, спектральна чутливість якого близька до нормалізованої функції відносної спектральної світлової ефективності випромінення  $V(\lambda)$  чи, принаймні, не була рівної нулю у видимій області спектра.

## 5 ГАБАРИТНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

### 5.1 Розрахунок об'єктива яскравоміра

Для габаритного розрахунку оптичної системи задаються діаметром польової діафрагми  $d_{п.д}$  чи розміром  $l'$  (відстань від об'єктива до польової діафрагми), що багато в чому визначає габарити яскравоміра (рис. 2в).

Коефіцієнт поперечного збільшення об'єктива  $\beta_{об}$  встановлюють за співвідношенням:

$$\beta_{об} = \frac{d_{п.д}}{d_{min}} \quad \text{або} \quad \beta_{об} = \frac{l'}{l} \quad (11)$$

Зазвичай приймають:  $d_{п.д} \sim 0,5 - 10$  мм чи  $l' \sim 50 - 200$  мм.

Фокусна відстань об'єктива ( $f_{об}$ ) визначають за формулою:

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f_{об}} \quad (12)$$

Далі зі стандартного ряду фокусних відстаней  $f_{ст.}$ :

12,5; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 60; 65; 75;  
80; 95; 105; 135; 150; 180; 210; 300; 500; 1000 (мм)

Обирається найближча стандартна фокусна відстань  $i$  за його значенням уточнюють значення  $d_{п.д}$  і  $l$ .

Отримані величини позначаються  $l_{ут}$ ,  $d_{п.д.ут}$ .

Діаметр об'єктива зазвичай складає  $0,4 f_{ст.}$

Якщо діаметр об'єктива вийшов набагато меншим за той, що задавався при виборі приймача випромінювання, то розрахунок треба повторити.

### 5.2 Розрахунок польової лінзи

Польова лінза створює зображення апертурної діафрагми на робочій поверхні приймача випромінювання. Коефіцієнт поперечного збільшення польової лінзи  $\beta_{п.л}$  визначають за формулою:

$$\beta_{п.л} = \frac{d_{пр}}{d_{вх.зіл}}, \quad (13)$$

де  $d_{пр}$  – діаметр робочої зони приймача випромінення;

$d_{вх.зін} = d_{ад}$  – діаметр вхідної зіниці яскравоміра.

Також коефіцієнт поперечного збільшення польової лінзи  $\beta_{пл}$  визначають за співвідношенням:

$$\beta_{пл} = \frac{l''}{l'} \quad (14)$$

де  $l'$  – відстань від апертурної діафрагми до польової діафрагми;

$l''$  – відстань від польової діафрагми до приймача випромінення.

З формули (14) знаходять відстань від польової діафрагми до приймача випромінення ( $l''$ ). Отримана відстань позначається  $l''$ .

Фокусну відстань польової лінзи встановлюють за формулою:

$$\frac{1}{l'_{ут}} + \frac{1}{l''} = \frac{1}{f_{пл}} \quad (15)$$

Якщо отримане значення  $f_{пл}$  відрізняється від стандартних, то зі стандартного ряду фокусних відстаней вибирається найближче значення.

12,5; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 60; 65; 75;  
80; 95; 105; 135; 150; 180; 210; 300; 500; 1000 (мм)

При цьому положення польової лінзи необхідно змістити і знайти нові відстані  $l'_{см}$  та  $l''$ , що позначаються тепер як  $l'_{см}$  та  $l''_{см}$ .

Значення їх визначається за результатами розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{1}{l'_{см}} + \frac{1}{l''_{см}} = \frac{1}{f_{пл(см)}} \\ l'_{см} + l''_{см} = l'_{ут} + l'' \end{cases} \quad (16)$$

Діаметр польової лінзи звичайно приймають з умови:  $d_{пл} \sim 1.5d_{п.д}$ .

Результати обчислень надають у вигляді таблиці.

Таблиця 1 – Габаритні розміри оптичної системи

$d_{мін}$ мм	$d_{вх.зін}$ мм	$L$ мм	$f_{об}$ мм	$d_{нд}$ мм	$l'$ мм	$d_{нд\ ут}$ мм	$l'_{ут}$ мм	$f_{пл}$ мм	$d_{пл}$ мм	$l''$ мм	$l'_{см}$ мм	$l''_{см}$ мм	$d_{пр}$ мм

### 5.3 Побудова оптичної схеми яскравоміра, ходу осьового та похилого пучка променів

Побудову оптичної схеми яскравоміра, ходу осьового і похилого пучка променів через оптичну систему роблять на одному рисунку, у масштабі, причому поперечний і подовжній масштаби можуть бути різними.

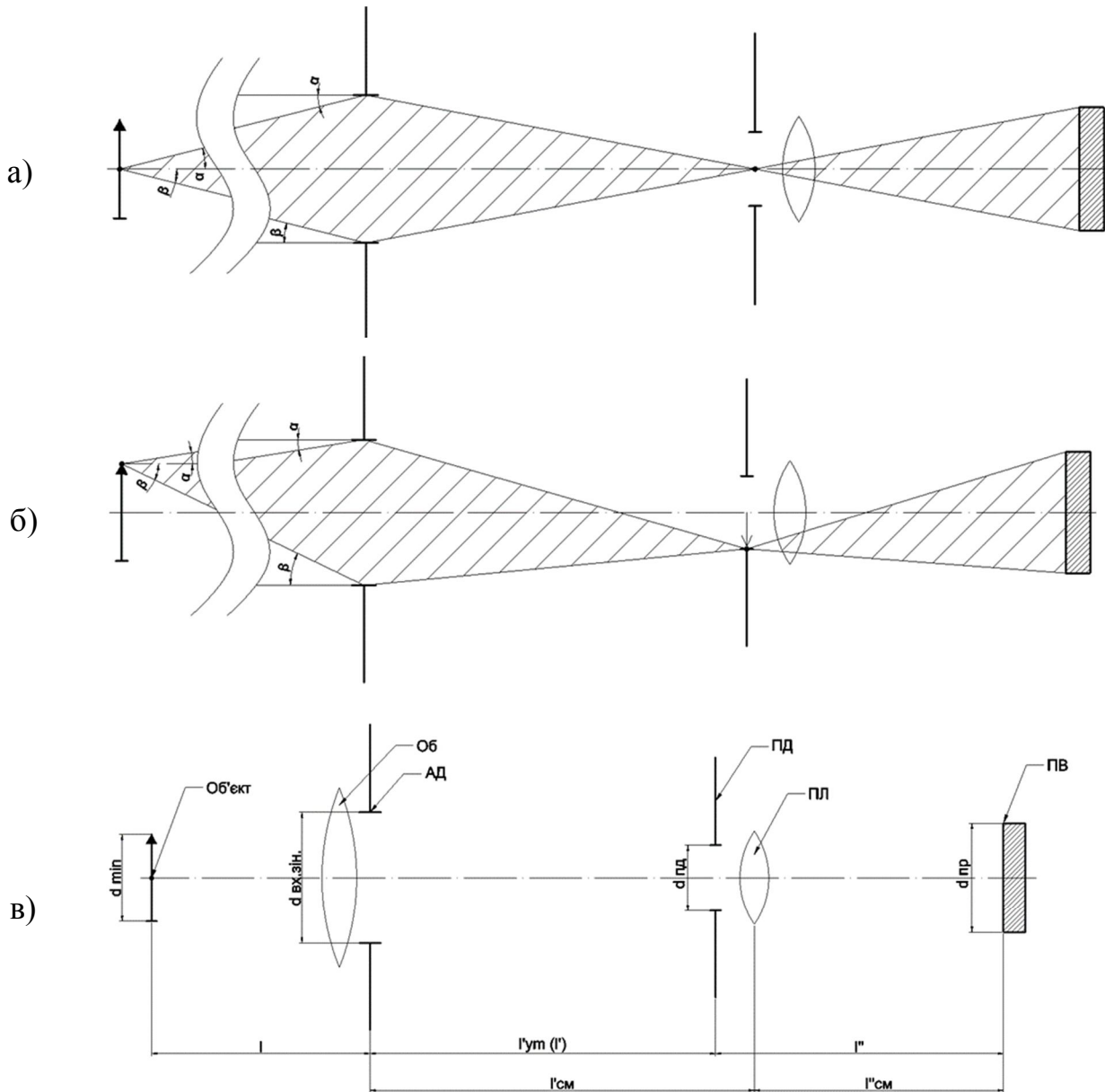


Рисунок 2 – Оптична схема яскравоміра (в), хід осьового (а) і похилого (б) пучка променів

## 6 РОЗРАХУНОК КОРИГУЮЧОГО ФІЛЬТРА

Коригуючий фільтр призначений для приведення відносної спектральної чутливості приладу з фізичним приймачем до відносної спектральної чутливості ока. В усьому видимому діапазоні довжин хвиль (через 10 нм) знаходиться відношення  $V(\lambda)/S_{\text{відн}}(\lambda)$ . Значення  $S_{\text{відн}}(\lambda)$  знаходиться з додатку В, а  $V(\lambda)$  або  $V'(\lambda)$  наведених у додатках Г, Д. Обирається максимальне значення  $V(\lambda)/S_{\text{відн}}(\lambda)$  і знаходиться коефіцієнт пропорційності  $m$  за формулою:

$$m = \frac{\tau(\lambda)_{\max}}{\left[ \frac{V(\lambda)}{S_{\text{відн}}(\lambda)} \right]_{\max}}. \quad (17)$$

Якщо фільтр чи систему фільтрів виготовляють з оптичного скла, то  $\tau(\lambda)_{\max}$  не може бути більш 0,92. Зазвичай  $\tau(\lambda)_{\max}$  складає 0,9.

$$\tau_{\text{к.ф.}}(\lambda)_{\max} = m \left[ \frac{V(\lambda)}{S_{\text{відн}}(\lambda)} \right]_{\max}. \quad (18)$$

Коефіцієнт пропускання коригуючого фільтра  $\tau_{\text{к.ф.}}(\lambda)$  за всією видимою частиною спектра визначається за формулою:

$$\tau_{\text{к.ф.}}(\lambda) = m \left[ \frac{V(\lambda)}{S_{\text{відн}}(\lambda)} \right]. \quad (19)$$

На інших ділянках спектра  $\tau_{\text{к.ф.}}(\lambda)$  приймають рівним нулю.

Результати обчислень зручно звести у таку таблицю:

Таблиця 2 – Розрахунок коригуючого фільтра

$\lambda_{\text{нм}}$	$V(\lambda)$	$S_{\text{відн}}(\lambda)$	$V(\lambda) / S_{\text{відн}}(\lambda)$	$\tau_{\text{к.ф.}}(\lambda)$
380				
390				
400				
...				
770				
780				

У роботі необхідно навести графіки функцій  $V(\lambda)$ ,  $S_{\text{відн}}(\lambda)$ ,  $\tau_{\text{к.ф.}}(\lambda)$ , які необхідно розмістити на одній координатній сітці для зручності узагальнення і сприйняття результатів розрахунку.

## 7 РОЗРАХУНОК СТАЛОЇ ЯСКРАВОМІРА

Стала яскравоміра показує реакцію приймача яскравоміра (у одиницях: струму, напруги тощо) на одиницю яскравості:  $C = \frac{L}{i}$ .

Приймають яскравість поверхні на довжині хвилі  $\lambda = 555_{\text{нм}}$  рівною  $L_0 = 1 \text{ кд/м}^2$ .

При цьому енергетична яскравість дорівнює:  $L_{\text{ео}} = \frac{1}{683} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ср}} \right]$

Реакцію приймача на це випромінення визначається за формулою:

$$i_0 = L_{\text{ео}} * G * S_{\lambda_{\text{max}}} * S_{\text{відн}(\lambda=555_{\text{нм}})} * \tau_{\text{к.ф}(\lambda=555_{\text{нм}})} * \tau_{\text{ос}}, \quad (20)$$

де  $G$  – міра безлічі пучка променів, що проходять через оптичну систему:

$$G_1 = \frac{\pi^2 d_{\text{min}}^2 d_{\text{вх.зін.}}^2}{16} \frac{1}{l^2}, \text{ м}^2, \quad (21)$$

де  $l$  – відстань від апертурної діафрагми до досліджуваної ділянки поверхні,

$$G_2 = \frac{\pi^2 d_{\text{вх.зін.}}^2 d_{\text{нд}}^2}{16} \frac{1}{l'^2}, \text{ м}^2, \quad (23)$$

де  $l'$  – відстань між апертурною і польовою діафрагмами,

$$G_3 = \frac{\pi^2 d_{\text{нд}}^2 d_{\text{нр}}^2}{16} \frac{1}{l''^2}, \text{ м}^2, \quad (24)$$

де  $l''$  – відстань між польовою діафрагмою і приймачем випромінення.

Коефіцієнт пропускання оптичної системи  $\tau_{\text{ос}}$  за законом Бугера у наближенні нульового розсіювання променів у скляних елементах оптичної системи визначається за формулою:

$$\tau_{\text{ос}} = (1-\rho)^n, \quad (25)$$

де  $\rho$  – коефіцієнт відбиття від границі розподілу «скло – повітря» ( $\rho = 0.04$ );

$n$  – кількість границь розподілу поміж середовищами різної природи в оптичній системі яскравоміра.

Остаточно стала яскравоміра визначається за формулою:

$$C = \frac{L_o}{i_o} = \frac{1}{i_o} \left[ \frac{\kappa \partial}{M^2} \cdot A^{-1} \right]. \quad (26)$$

При вимірах яскравість за реакцією приймача визначають зі співвідношення:

$$L = C \cdot i. \quad (27)$$



## 8 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

Пояснювальна записка до курсової роботи повинна відповідати вимогам ЄСКД. Вона має містити такі структурні одиниці:

1. Вступ з поясненням задач і мети курсової роботи.
2. Розділ з обґрунтуванням вибору і розрахунку приймача випромінювання.
3. Розрахунок основних габаритних розмірів оптичної системи.

Схематичне зображення розрахункової оптичної схеми і ходу осьового і похилого пучка променів.

Таблиця з розрахунковими розмірами оптичної схеми.

4. Розрахунок коригуючого фільтра.

Таблицю значень спектральної чутливості ока, приймача і спектрального коефіцієнта пропускання коригуючого фільтра.

Сполучені на одній координатній сітці графіки функцій

$$V(\lambda), \quad S_{\text{відн.}}(\lambda), \quad \tau_{\text{к.ф.}}(\lambda).$$

4. Ескіз фотоелектричного яскравоміра.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Назаренко Л. А. Основи радіометрії і фотометрії: монографія. / Л. А. Назаренко, В. М. Сорокін – Харків : ХНУМГ, 2014. – 351 с.
2. Иванов В. С. Основы оптической радиометрии: учебник. / В. С. Иванов, Ю. М. Золотаревский, А. Ф. Котюк – Москва : Физматлит, 2003. – 544 с.
3. Долгов В. Фотометрия в лабораторной практике: книга / В. Долгов, Е. Ованесов, К. Щетрикович – Москва : Витал Диагностикс, 2004. – 192 с.
4. Меньшикова В. Л. Химический анализ в энергетике: книга 1. Фотометрия / В. Л. Меньшикова – Москва : Издательский дом МЭИ, 2008. – 407 с.
5. Справочная книга по светотехнике. / Под ред. Ю. Б. Айзенберга – 3–е изд. перераб. и доп. – Москва : Знак, 2006. – 972 с.
6. Поліщук В. М. Конспект лекцій з фотометрії. / В. М. Поліщук – Харків: ХНАМГ, Харків, 2008. – 146 с.

ДОДАТОК А  
Варіанти завдань

А				
№ варіанта	$L_{\min}, \frac{\kappa \partial}{M^2}$	$d_{\min}, \text{см}$	$l, \text{см}$	$\alpha$ , ціна ділення приладу, А/діл
1	10	20	100	$10^{-4}$
2	10	30	150	$10^{-3}$
3	10	40	200	$10^{-6}$
4	10	15	50	$10^{-3}$
5	10	10	50	$10^{-3}$
6	100	5	70	$10^{-3}$
7	$10^2$	10	100	$10^{-6}$
8	$10^2$	15	200	$10^{-3}$
9	$10^2$	20	300	$10^{-9}$
10	100	25	400	$10^{-6}$
11	$10^3$	1	100	$10^{-6}$
12	$10^3$	5	200	$10^{-9}$
13	$10^3$	10	300	$10^{-6}$
14	$10^3$	17	400	$10^{-9}$
15	$10^3$	20	450	$10^{-6}$
16	$10^0$	20	100	$10^{-9}$
17	$10^0$	30	200	$10^{-9}$
18	$10^0$	40	500	$10^{-9}$
19	$10^0$	50	300	$10^{-9}$
20	1	60	400	$10^{-9}$
21	$10^{-2}$	10	300	$10^{-9}$
22	$10^{-2}$	15	100	$10^{-8}$
23	$10^{-2}$	20	200	$10^{-6}$
24	$10^{-2}$	25	500	$10^{-9}$
25	$10^{-2}$	30	400	$10^{-9}$
26	$10^{-2}$	35	700	$10^{-9}$
27	$10^{-2}$	40	900	$10^{-9}$

<b>В</b>				
№ варіанта	$L_{\min}, \frac{\kappa\delta}{M^2}$	$d_{\min}, \text{см}$	$l, \text{см}$	$\alpha$ , ціна ділення приладу, А/діл
1	$10^{-2}$	40	900	$10^{-9}$
2	$10^{-2}$	35	700	$10^{-9}$
3	$10^{-2}$	30	400	$10^{-6}$
4	$10^{-2}$	25	500	$10^{-6}$
5	$10^{-2}$	20	200	$10^{-8}$
6	$10^{-2}$	15	100	$10^{-8}$
7	100	10	300	$10^{-8}$
8	1	60	400	$10^{-8}$
9	1	50	300	$10^{-8}$
10	1	40	500	$10^{-8}$
11	1	30	200	$10^{-8}$
12	1	20	100	$10^{-8}$
13	$10^3$	20	450	$10^{-6}$
14	$10^3$	1	100	$10^{-6}$
15	$10^3$	15	450	$10^{-9}$
16	$10^3$	10	300	$10^{-6}$
17	$10^3$	5	200	$10^{-6}$
18	100	5	70	$10^{-3}$
19	100	10	400	$10^{-6}$
20	100	15	900	$10^{-9}$
21	100	10	100	$10^{-3}$
22	100	5	150	$10^{-3}$
23	10	20	100	$10^{-3}$
24	10	30	150	$10^{-3}$
25	10	40	200	$10^{-3}$
26	10	15	50	$10^{-3}$
27	$10^0$	30	200	$10^{-9}$
28	1	40	500	$10^{-9}$
29	1	50	300	$10^{-9}$
30	1	60	400	$10^{-9}$

<b>С</b>				
№ варіанта	$L_{\min}, \frac{\kappa\partial}{\text{м}^2}$	$d_{\min}, \text{см}$	$l, \text{см}$	$\alpha$ , ціна ділення приладу, А/діл
1	100	10	100	$10^{-6}$
2	100	15	200	$10^{-3}$
3	100	20	300	$10^{-9}$
4	10	25	400	$10^{-6}$
5	$10^3$	1	100	$10^{-6}$
6	$10^3$	5	200	$10^{-8}$
7	$10^3$	10	300	$10^{-8}$
8	$10^3$	15	400	$10^{-6}$
9	$10^3$	20	450	$10^{-6}$
10	1	20	100	$10^{-9}$
11	$10^0$	30	200	$10^{-9}$
12	1	40	500	$10^{-9}$
13	1	50	300	$10^{-9}$
14	1	60	400	$10^{-9}$
15	10	10	300	$10^{-6}$
16	$10^{-2}$	15	100	$10^{-9}$
17	$10^{-2}$	20	200	$10^{-6}$
18	$10^{-2}$	25	500	$10^{-6}$
19	$10^{-2}$	30	400	$10^{-9}$
20	10	35	700	$10^{-6}$
21	$10^{-2}$	40	900	$10^{-9}$
22	10	20	100	$10^{-3}$
23	10	30	150	$10^{-3}$

ДОДАТОК Б  
**Приймачі випромінювання**



Рисунок Б.1 – Фотоелемент Hamamatsu R1328U-51, Київ

Основні характеристики:

Діаметр фоточутливої поверхні, мм – 10;

Оптичний вхід торцевий;

Матеріал фотокатода – Ag–O–Cs;

Матеріал вікна – боросилікатне скло;

Діапазон спектральної чутливості, нм 300 – 1100;

Пік спектрального діапазону – 750 нм;

Типова світлова чутливість – 20 мкА/лм;

Максимальна спектральна чутливість – 2,5 мА/Вт;

Піковий струм катода – 0,3 А;

Напруга живлення анода – 2500 В.

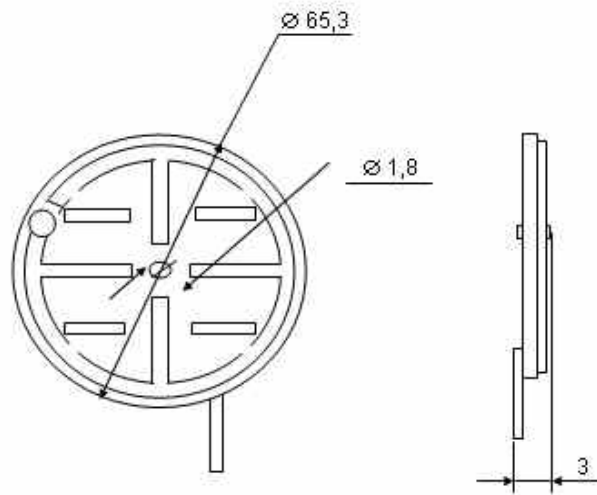


Рисунок Б.2 – Фотоелемент селеновий Ф55С

Основні характеристики:

Діаметр фоточутливої поверхні, мм – 60;

Робоча температура, С0 –  $20 \pm 5$ ;

Діапазон спектральної чутливості, мкм – 0,4 – 0,75;

Максимум спектральної характеристики, мкм – 0,5 – 0,6;

Інтегральна чутливість за струмом, мА/лк, не менше ніж – 0,5;

Напруга холостого ходу при освітленості 10 лк, мВ – 125;

Фотострум, мкА при освітленості 10 лк і навантаженні 700 Ом, не менше – 13;  
при освітленості 100 лк і навантаженні 100 Ом, не менш ніж  $10 \pm 5\%$ ;

Стомлюваність, %, не більше – 2;

Температурний коефіцієнт, % С, не більше – 1;

Маса, г не більше ніж – 41,2.



Рисунок Б.3 – Фотоелемент селеновий Ф41С

Технічні характеристики Ф41С:

Діаметр фоточутливої поверхні – 23 мм.

Діапазон спектральної чутливості – від 0,4 мкм до 0,75 мкм.

Максимум спектральної характеристики – від 0,55 мкм до 0,6 мкм.

Інтегральна струмова чутливість – не менше ніж 0,6 мА/лм.

Робоча температура –  $20 \pm 5$  °С.

Фотострум, мкА при освітленості 87 лк і навантаженні 3 кОм –  
не менше ніж 11 мкА.

Стомлюваність не більше – 0,6 ступені.

Температурний коефіцієнт Ф41С – не більше 0,03 ступені °С.

Маса – не більше 5,5 г.

(Також цей вироб може називатися: Ф 41 С, Ф–41–С, Ф–41 С, Фч1С, f41s, f 41 s,  
f–41–s)





Рисунок Б.4 – Вакуумний фотоелемент Ф

(Також цей прилад може називатися: photocellf)

Технічні характеристики фотоелемента Ф (Ф–10 Ф–15 Ф–26):

Фотокатод – сурмяно–калієво–натрієво–цезієвий; мультілузний;  
полупрозорий;

Оптичний вхід – торцевий; боковий;

Форма фотокатода – заокруглена;

Робоче положення – будь–яке;

Діаметр робочої площі – не більше 60 мм;

Світлова чутливість – не менше 70 мкА/лм;

Спектральна чутливість – не менше 6 мкА/мВт;

Напряжуга живлення – не більше 150 В;

Найбільший темновий струм – 10–12 А;

Боковий вивід на балоні – фотокатод.

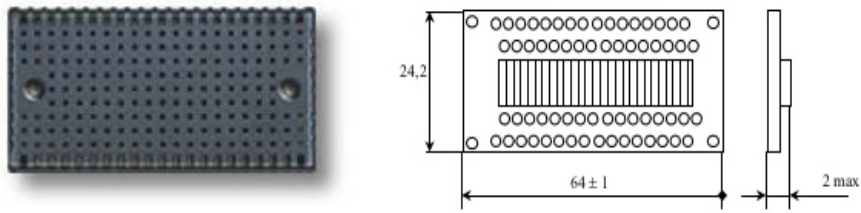


Рисунок Б.5 – Фотодіод «ГРАНІТ»

Технічні характеристики фотодіода:

Інтегральна чутливість за струмом кожного ФЧЕ – не менше 4,8 мА/лм;

Діапазон спектральної чутливості – 0,25мкм–1,1мкм;

Монохроматична чутливість за струмом при  $\lambda = 0,4\text{мкм}$  – не менше 0,18А/Вт;

Темновий струм при напрузі зміщення  $U_{зм} = 5\text{ В}$  – не більше 0,6 нА;

Розмір фоточутливого елемента – 0,72мм<sup>2</sup>;

Фотодіод германієвий.

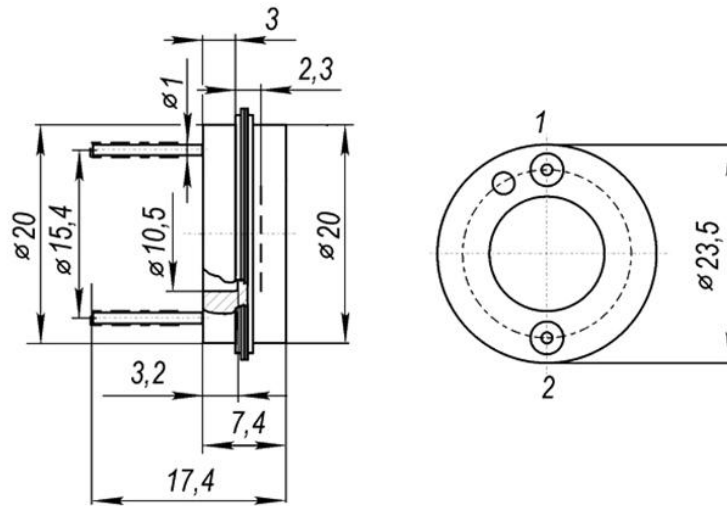


Рисунок Б.6 – Фотодіод «КВАНТ»

Фотодіод КВАНТ застосовується в метрології, спектрофотометрії в ультрафіолетовій, видимій та ближній інфрачервоній областях спектра, колориметрії, фотометрії і наукових дослідженнях.

Технічні характеристики фотодіода:

Площа фоточутливого елемента – 100 мм<sup>2</sup>;

Інтегральна чутливість за струмом кожного ФЧЕ – не менше 4,8 мА/лм;

Режим роботи – фотогальванічний;

Напруга зміщення – не більше 10мВ;

Темновий струм кожного ФЧЕ при  $U_{зм} = 10$  мВ – не більше 3 нА;

Діапазон спектральної чутливості – 0,2 мкм – 1,1 мкм;

Монохроматична чутливість за струмом при  $\lambda = 0,25$  мкм – не менше 0,08А/Вт;

Монохроматична чутливість за струмом при  $\lambda = 0,55$  мкм – не менше 0,3А/Вт;

Фотодіод кремнієвий;

Корпус виробу – металоскляний.

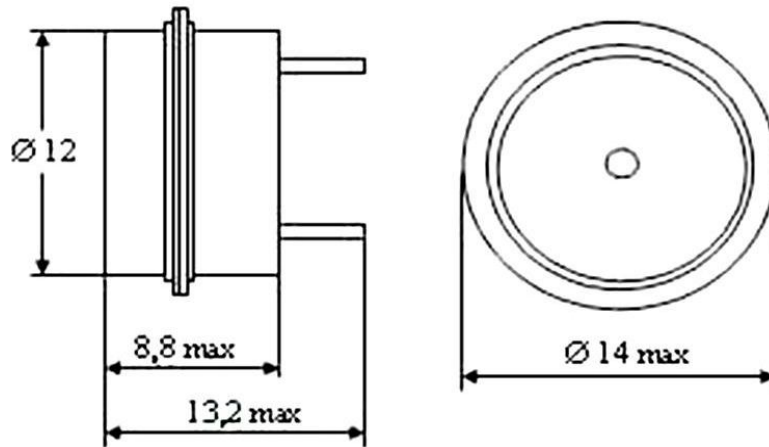


Рисунок Б.7 – Фотодіод германієвий ФД–287  
(ФД287, ФД 287, fd–287, fd287, fd 287).

ФД–287 фотодіод германієвий призначено для перетворення світлових сигналів в електричні.

Область застосування – метрологія, оптичні тестери, імпульсна фотометрія, датчики оптичного випромінення в діапазоні довжин хвиль: 0,6 – 1,8 мкм.

Технічні характеристики фотодіода ФД–287:

Діаметр фоточутливого елемента – 1 мм;

Робоча напруга – 10 В;

Інтегральна чутливість за струмом кожного ФЧЕ – не менше 4,8 мА/лм;

Темновий струм ФЧЕ не більше 4 мкА;

Темновий струм кожного ФЧЕ при  $U = 10$  мВ – не більше 0,35 мкА;

Діапазон спектральної чутливості – від 0,5 мкм до 1,7 мкм;

Максимальна спектральна характеристика – від 1,5 мкм до 1,55 мкм.

Монохроматична чутливість за струмом при  $\lambda = 1,55$  мкм – не менше 0,7 А/Вт;

Монохроматична чутливість за струмом при  $\lambda = 0,55$  мкм – не менше 0,3 А/Вт;

Фотодіод кремнієвий;

Корпус виробача – металічний;

Габаритні розміри: – довжина – 13,2 мм; – діаметр – 12 мм.

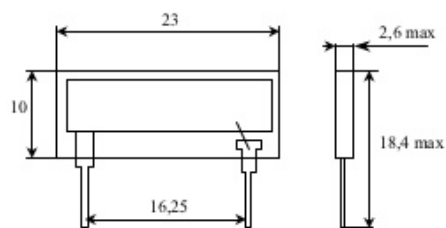


Рисунок Б.8 – Фотодіод кремнієвий ФД–295

(ФД295, ФД 295, fd–295, fd295, fd 295)

Технічні характеристики фотодіода ФД – 295:

Розміри фоточутливого елемента 20 мм × 5 мм;

Робоча напруга – 0,5 В;

Інтегральна чутливість за струмом кожного ФЧЕ – не менше 4,8 мА/лм;

Темновий струм ФЧЕ не більше 0,2 мкА

Діапазон спектральної чутливості – від 0,4 мкм до 1,05 мкм;

Максимальна спектральна характеристика – 0,8 мкм

Монохроматична чутливість за струмом при  $\lambda = 0,63$  мкм – не менше 0,35 А/Вт;

Фотодіод кремнієвий;

Корпус виробу – пластмасовий;

Габаритні розміри: 23 мм × 28,4 мм × 2,6 мм

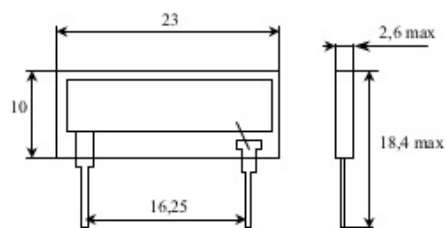


Рисунок Б.9 – Фотодіод ФД296М (ФД–296М, ФД 296М)

Технічні характеристики фотодіода ФД296М:

Діапазон спектральної чутливості – 0,4мкм–1,1мкм;

Монохроматична чутливість за струмом при  $\lambda = 0,85\text{мкм}$  – не менше 0,31А/Вт;

Темновий струм при напрузі зміщення  $U_{зм} = 3\text{В}$  – не більш ніж 50нА;

Інтегральна чутливість за струмом кожного ФЧЕ – не менш ніж 4,8 мА/лм;

Розміри фоточутливого елемента – 1,55x1,55мм<sup>2</sup>;

Напруга зміщення – не більше 3В;

Фотодіод германієвий.

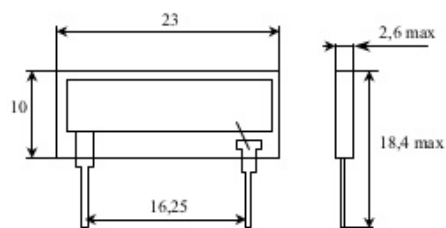


Рисунок Б.10 – Фотодіод кремнієвий квадратний УФД–18

Технічні характеристики фотодіода УФД – 18:

Ефективний діаметр фоточутливого елемента 12 мм (14 мм).

Монохроматична чутливість за струмом при  $\lambda = 1,06$  мкм, температурі  $+20$  °С і тривалості лазерного імпульсу 20 нс – не менше 0,2 А/Вт.

Структура фотодіода – р–і–п–діод.

Темновий струм при температурі  $+20$ ° С:

– фоточутливого елемента – не більше 7 мкА;

– захисного кільця – не більше 100 мкА.

Ємкість фоточутливого елемента УФД–18 – не більше 20 пФ.

Еквівалентна потужність шуму при  $+20$  °С – не більше 10 пВт/Гц<sup>1/2</sup>.

Напруга пробою фоточутливого елемента при  $+20$  °С – не менше 300 В.

Робоча напруга – від 125 В до 135 В.



Рисунок Б.11 – Фотоелектронний помножувач ФЕП – 28 (ФЭУ–28)

ФЕП–28 фотоелектронний помножувач призначений для перетворення оптичного випромінення в електричний сигнал з наступним його підсиленням.

Він складається з фотокатода, діодної помножувальної системи і аноду.

Технічні характеристики:

Світлова чутливість фотокатода – не менше ніж 40 мкА/лм.

Світлова анодна чутливість – 1 А/лм.

Область максимальної спектральної чутливості – від 0,76 мкм до 0,82 мкм.

Робоча напруга живлення – не більше 1300 В.

Число діодів помножувача ФЕП–28 – 11.

Темновий струм помножувача при світловій анодній чутливості 1 А/лм – 0,2·мкА.

Анодний струм – 100 мкА.

Поріг чутливості –  $3,5 \cdot 10^{-11}$  лм/Гц<sup>1/2</sup>.

Розташування вхідного вікна ФЕП–28 – торцеве.

Цоколь – РШ30.

Оформлення – скляне.

Фотокатод – кисне–срібляно–цезієвий.

Розмір фотокатода – 25 мм.

Температура навколишнього середовища – від –60° С до +50° С.

Габаритні розміри:

– довжина – 117 мм;

– діаметр – 35 мм.

Маса – не більше 60 г.



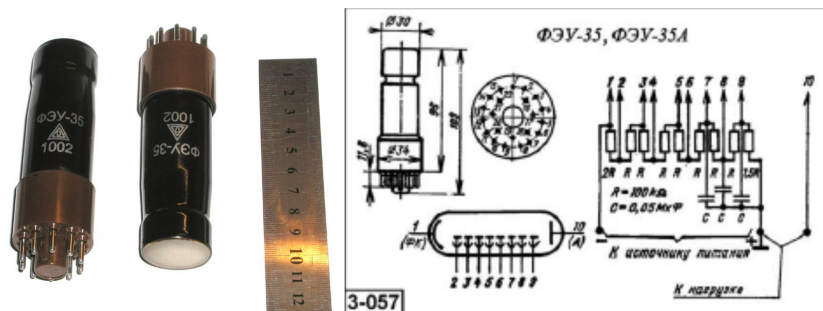


Рисунок Б.12 – Фотоелектронний помножувач ФЕП –35 (ФЭУ–35).  
 Фотоелектронний помножувач призначено для перетворення оптичного випромінення в електричний сигнал з наступним його посиленням.  
 Він складається з фотокатода, діодної помножувальної системи і аноду.

Технічні характеристики:

Світлова чутливість фотокатода – 40 мкА/лм.

Спектральна чутливість – не менше 0,02 А/Вт.

Фотокатод – сурмяно–цезієвий

Область спектральної чутливості – від 0,38 мкм до 0,42 мкм.

Область максимальної спектральної чутливості – від 0,3 мкм до 0,6 мкм.

Світлова анодна чутливість – від 700 А/лм до 1750 А/лм.

Світловий енергетичний еквівалент темного струму – 1,8 кэВ.

Робоча напруга живлення – не більше 1750 В.

Число діодів помножувача – 8.

Темнової струм помножувача  
 при світловій анодній чутливості 10 А/лм – 0,02 мкА.

Анодний струм – не більш ніж 50 мкА.

Розташування вхідного вікна ФЕП–35 – торцеве.

Розмір фотокатода – 25 мм.

Температура навколишнього середовища – від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ .

Габаритні розміри:

– довжина – 109 мм;

– діаметр – 30 мм.

Маса – не більше 50 г.

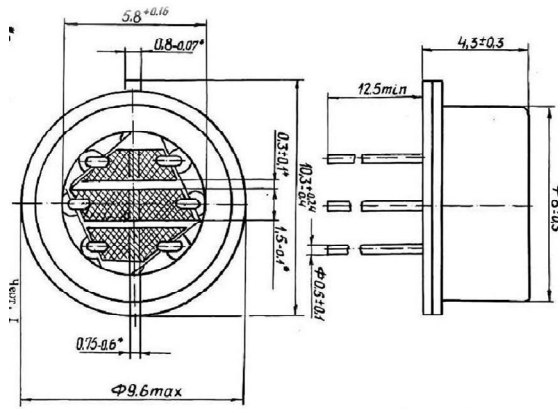


Рисунок Б.13 – Фоторезистор СФ2–12

СФ2–12 фоторезистор предназначено для перетворення світлових сигналів в електричні, в колах постійного і змінного струмів.

Технічні характеристики СФ2–12:

Напруга живлення – 5 В.

Загальний струм:

- при  $E = 5$  лк – не менше 10 мкА;
- при  $E = 300$  лк – від 200 мкА до 1200 мкА.

Темновий струм:

- при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  – не більше 0,3 мкА;
- при  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  – не більше 2 мкА.

Темновий опір фоторезистор СФ2–12 – не менше 15 МОм.

Величина постійної часу при зростанні загального струму:

- при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $E = 5$  лк; напруга – 15 В – не більше 200 мс;
- при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $E = 300$  лк; напруга – 5 В – не більше 25 мс;
- при  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $E = 300$  лк; напруга – 5 В – не більше 0 мс.

Рівень шумів, при  $E = 300$  лк; напруга – 5 В – не більше 10 мкВ/В.

Температурний коефіцієнт:

- $E = 5$  лк;  $U = 15$  В – від  $-0,8/1\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+0,4/1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- $E = 300$  лк;  $U = 5$  В – від  $-0,3/1\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+0,4/1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Спектральна характеристика чутливості:

- максимальна спектральна характеристика – від 0,52 мкм до 0,6 мкм;
- нормативна межа чутливості на рівні 0,3 – від 0,35 мкм до 0,55 мкм;
- довгохвильова межа чутливості на рівні 0,3 – від 0,63 мкм до 0,85 мкм.

Габаритні розміри –  $8,3 \times 16,8$  мм.



Рисунок Б.14 – Фоторезистор СФ2–5А (СФ25А, СФ2 5А, sf2–5а, sf25а, sf2 5а)

СФ2–5А призначений для перетворення світлових сигналів в електричні, в колах постійного і змінного струмів.

Технічні характеристики СФ2 – 5А:

Напруга живлення – не більше 1,3 В.

Загальний струм, при  $E = 200$  лк – не менше 500 мкА.

Темновий опір СФ2–5А – не менше 1 МОм.

Температурний коефіцієнт загального струму –  $\pm 0,7\%/^{\circ}\text{C}$ .

Довжина хвилі, що відповідає максимуму спектральної чутливості –  $0,55 \pm 0,02$  мкм.

Темновий струм при напрузі 3 В – не більше 2 мкА.

Габаритні розміри –  $10,7 \times 6,1$  мм.

Маса – не більше 2 г.

## ДОДАТОК В

### Спектральні характеристики приймачів випромінювання

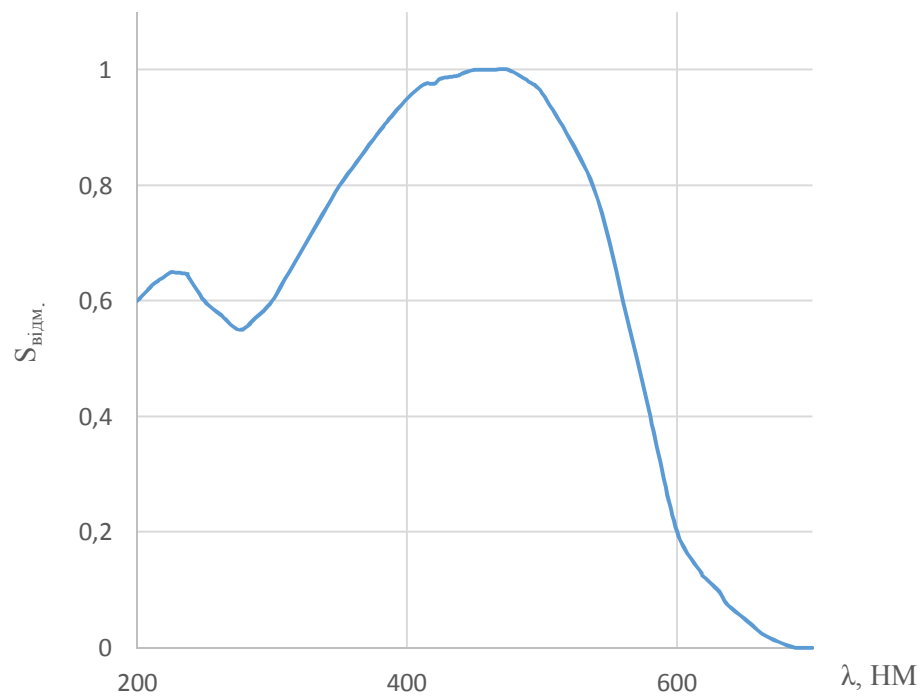


Рисунок В.1 – Спектральна характеристика сурм'яно-цезієвого фотокатода (з кварцевим вікном)

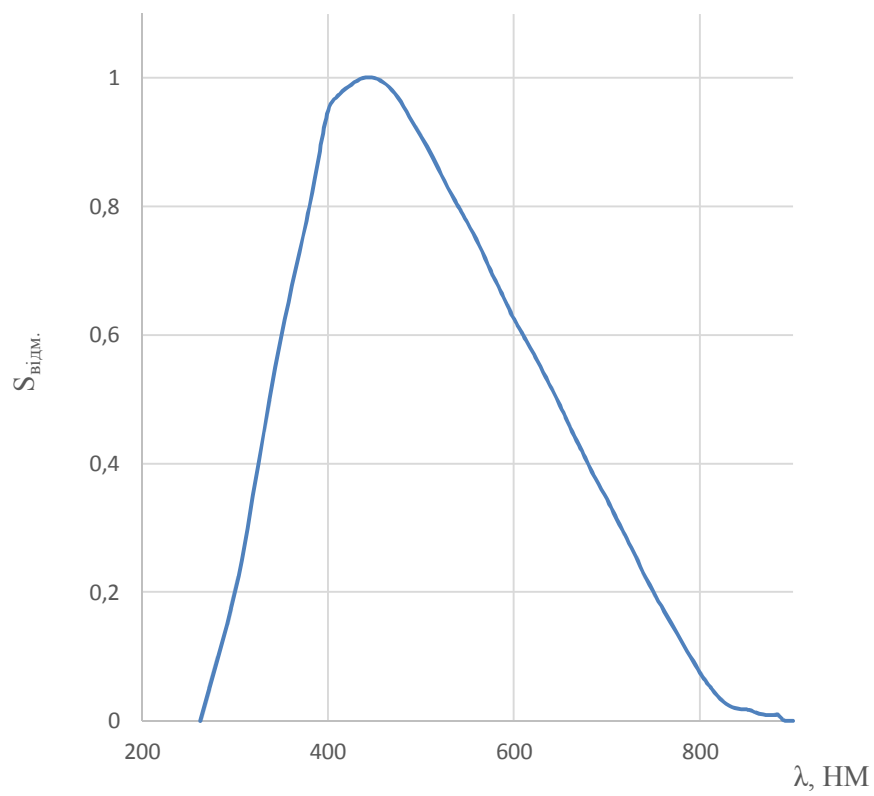


Рисунок В.2 – Спектральна характеристикам мультіпикового фотокатода

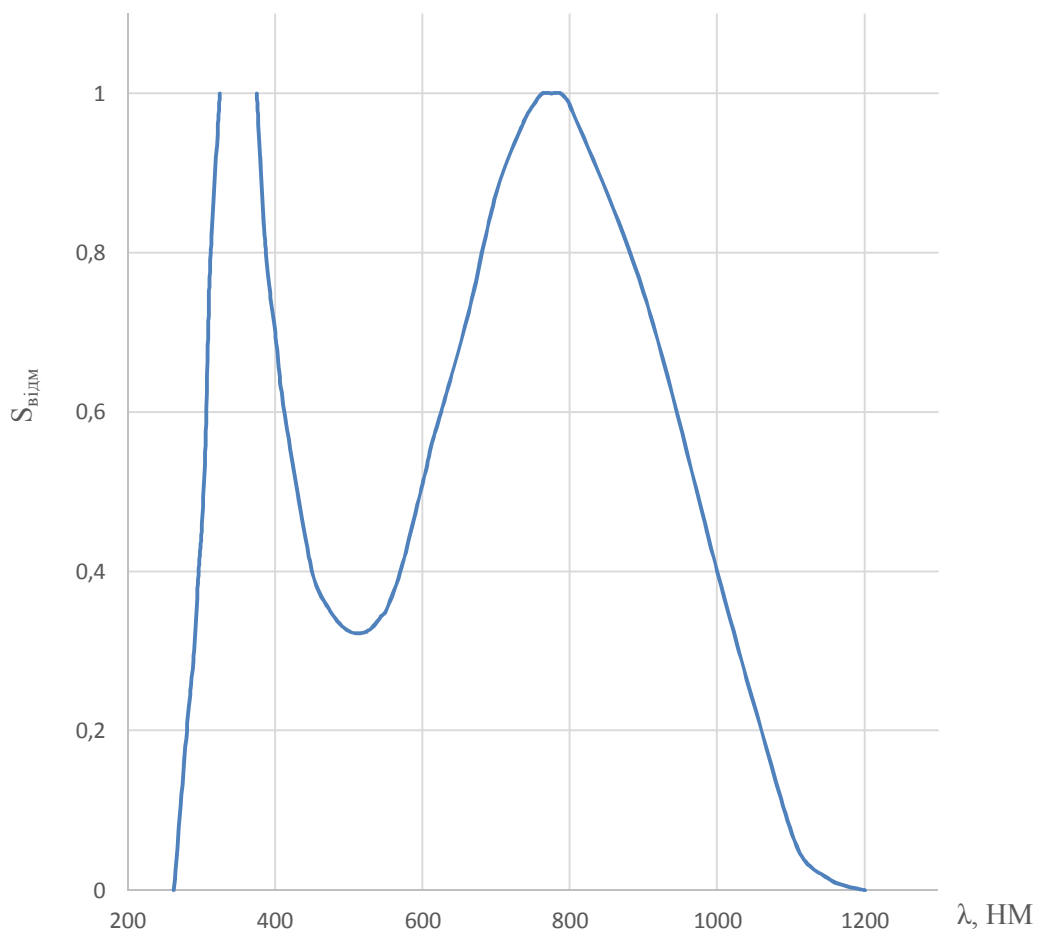


Рисунок В.3 – Спектральна характеристика кисне-срібляно-цезієвого фотокатоду

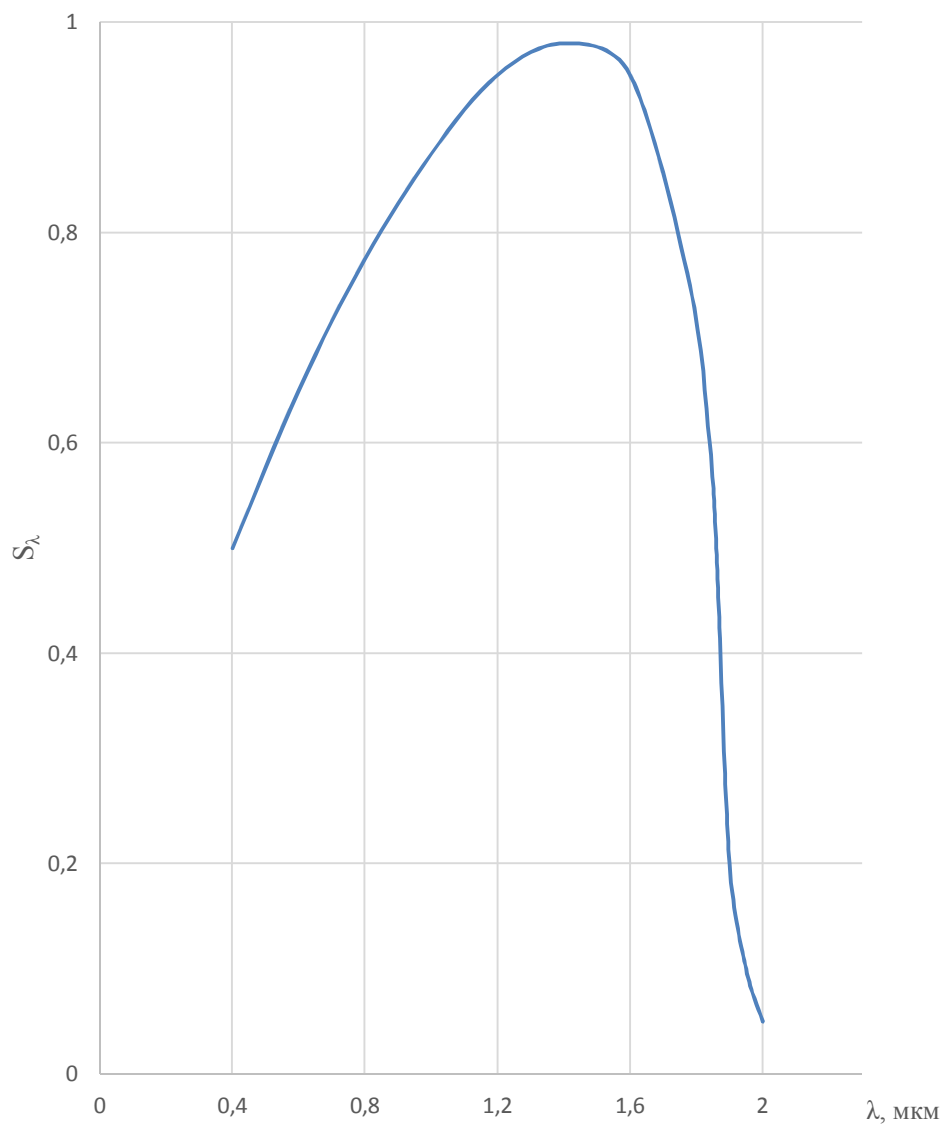


Рисунок В.4 – Спектральна характеристика германієвого фотодіода

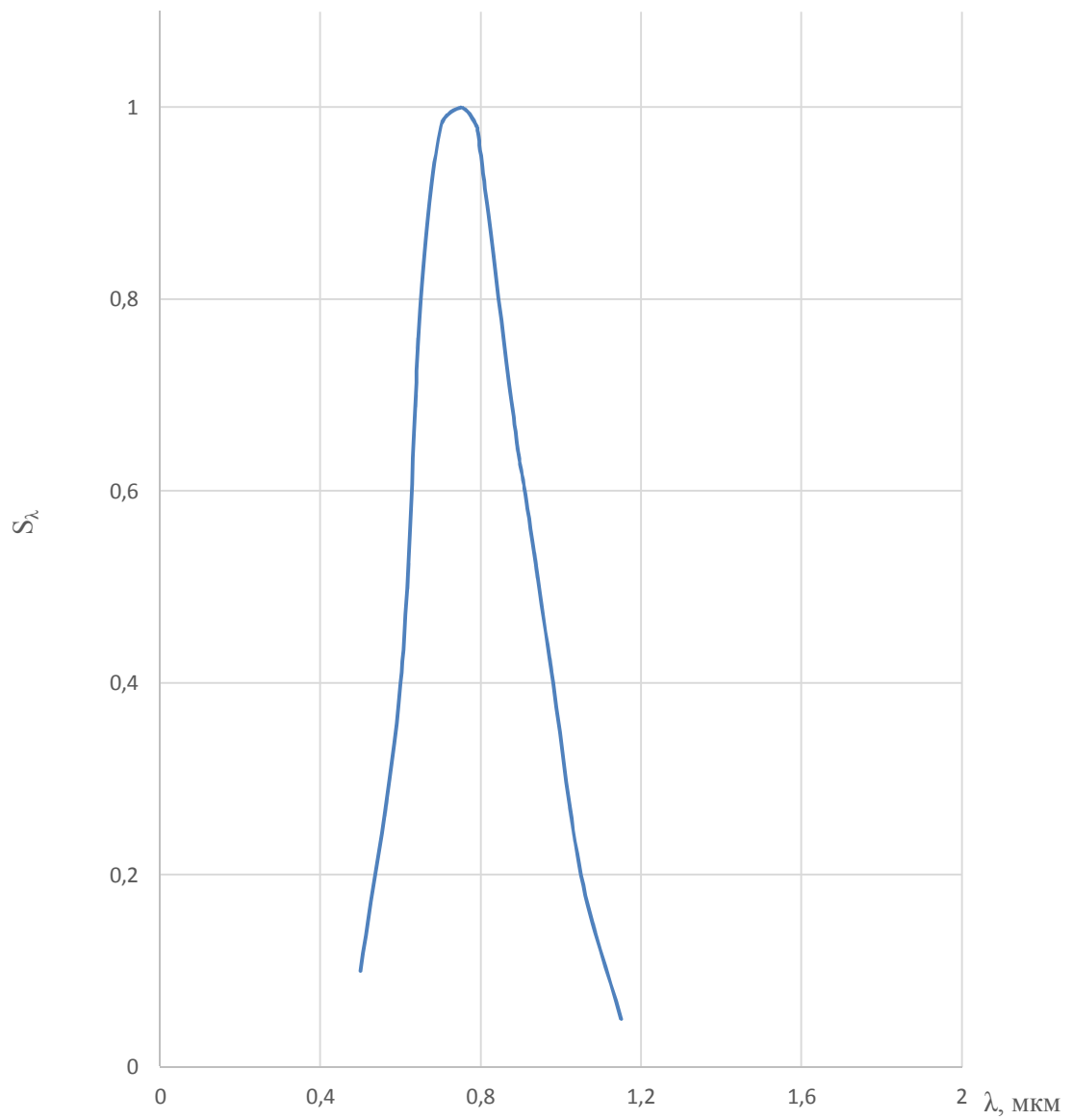


Рисунок В.5 – Спектральна характеристика кремнієвого фотодіода



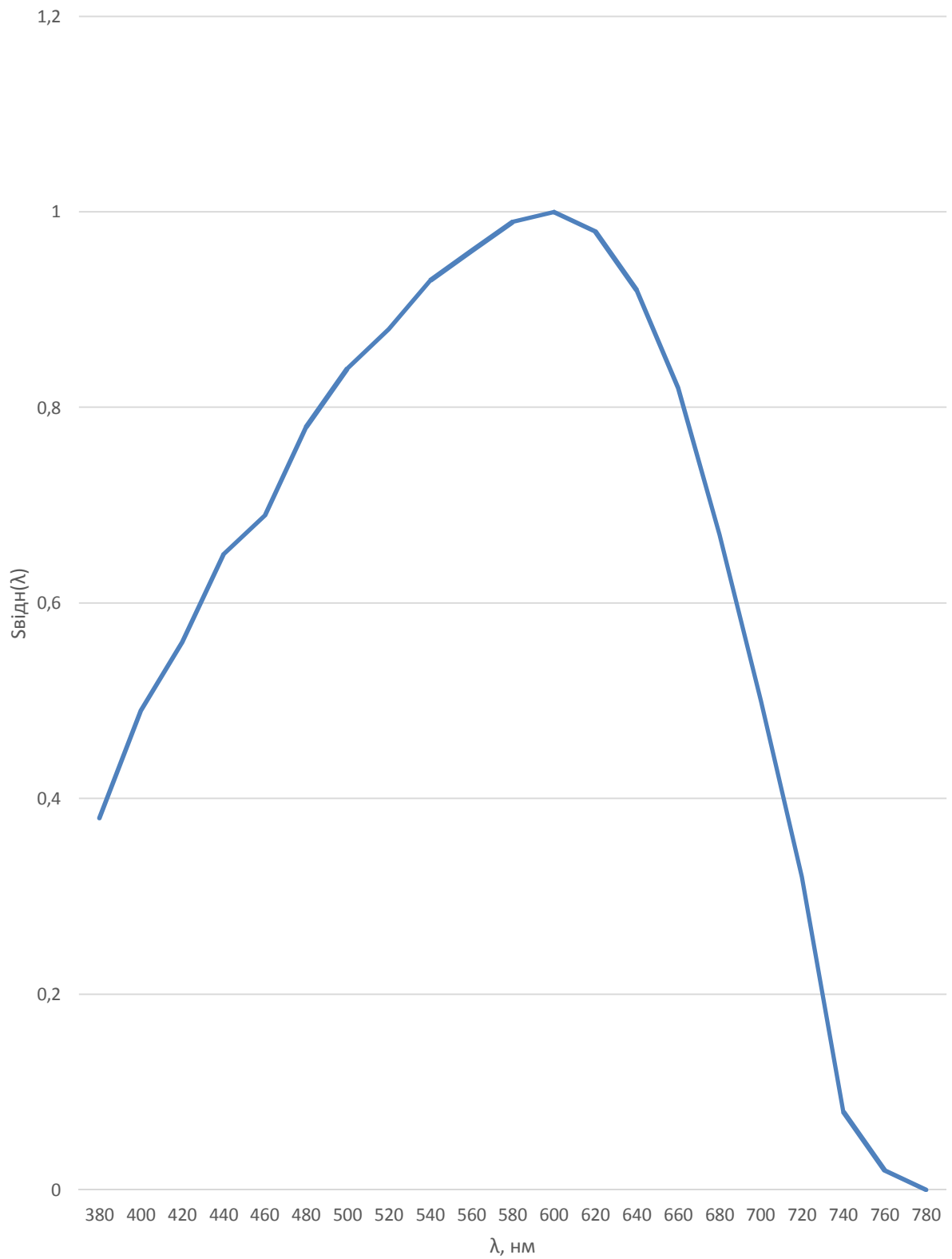


Рисунок В.6 – Спектральна характеристика селенового фотоелемента

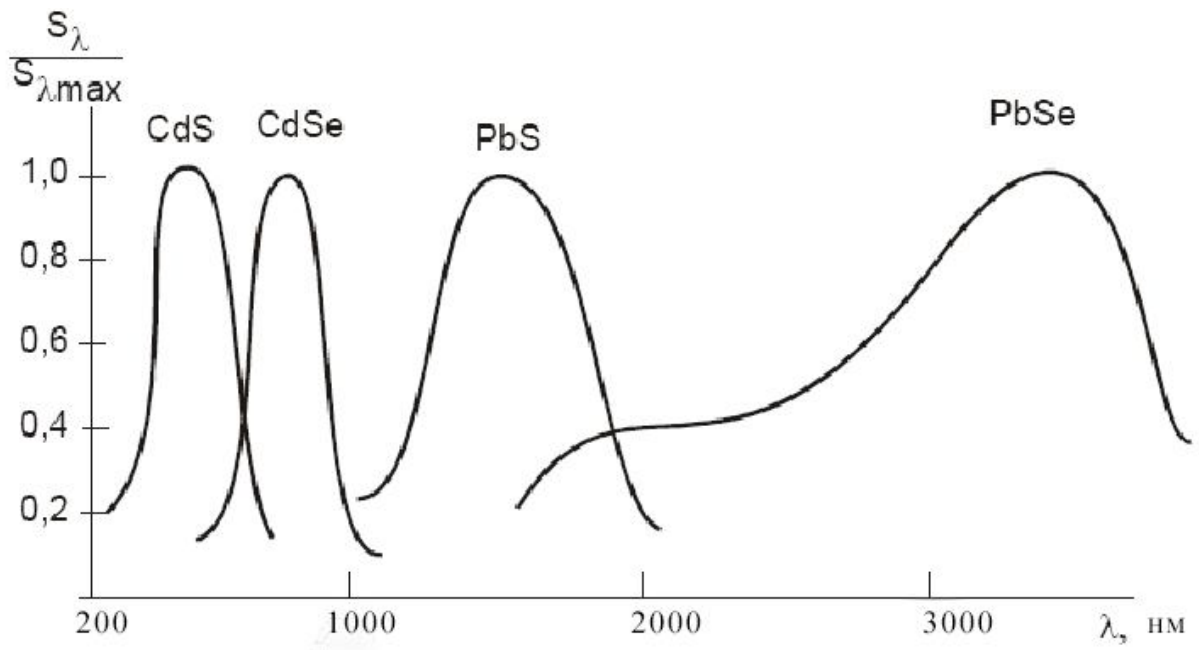


Рисунок В.7 – Спектральна характеристика фотодіода на основі CdS, CdSe, PbS, PbSe:

## ДОДАТОК Г

### Значення нормалізованих функцій відносної спектральної світлової ефективності випромінення $V(\lambda)$

Таблиця Г.1 – Нормалізована функція відносної спектральної світлової  
ефективності випромінення  $V(\lambda)$

$\lambda$	$V(\lambda)$	$\lambda$	$V(\lambda)$	$\lambda$	$V(\lambda)$	$\lambda$	$V(\lambda)$
380	0,00004	485	0,1693	590	0,7570	695	0,00572
385	0,00006	490	0,280	595	0,6949	700	0,00410
390	0,00012	495	0,2586	600	0,6310	705	0,00273
395	0,00022	500	0,3230	605	0,5668	710	0,00209
400	0,00040	505	0,4073	610	0,5030	715	0,00148
405	0,00064	510	0,5030	615	0,4412	720	0,00105
410	0,00121	515	0,6082	620	0,3810	725	0,00074
415	0,00218	520	0,710	625	0,3210	730	0,00052
420	0,00400	525	0,7932	630	0,2650	735	0,00036
425	0,00730	530	0,8620	635	0,2170	740	0,00025
430	0,01160	535	0,9149	640	0,1750	745	0,00017
435	0,0168	540	0,9540	645	0,1382	750	0,00012
440	0,0240	545	0,9803	650	0,1070	755	0,000086
445	0,0298	550	0,9950	655	0,0816	760	0,00006
450	0,0380	555	1,0000	660	0,0610	765	0,00004
455	0,0480	560	0,9950	665	0,0446	770	0,00003
460	0,0160	565	0,9786	670	0,0320	775	0,00002
465	0,0739	570	0,9520	675	0,0232	780	0,000015
470	0,0910	575	0,9134	680	0,0179		
475	0,1126	580	0,8700	685	0,0119		
480	0,139	585	0,8163	690	0,00821		

## ДОДАТОК Д

### Значення нормалізованих функцій відносної спектральної світлової ефективності випромінення $V'(\lambda)$

Таблиця Д.1 – Нормалізована функція відносної спектральної світлової  
ефективності випромінення  $V'(\lambda)$

$\lambda$	$V'(\lambda)$	$\lambda$	$V'(\lambda)$	$\lambda$	$V'(\lambda)$
380	0,000589	520	0,935	660	0,0003129
390	0,002209	530	0,811	670	0,0001480
400	0,00929	540	0,650	680	0,0000715
410	0,03484	550	0,481	690	0,00003533
420	0,0966	560	0,3288	700	0,00001780
430	0,1998	570	0,2076	710	0,00000914
440	0,3281	580	0,1212	720	0,00000478
450	0,455	590	0,0655	730	0,000002546
460	0,567	600	0,03315	740	0,000001379
470	0,676	610	0,01593	750	0,000000760
480	0,793	620	0,00737	760	0,000000425
490	0,904	630	0,003335	770	0,000000241
500	0,982	640	0,001797	780	0,000000139
510	0,997	650	0,000677		

*Виробничо-практичне видання*

Методичні рекомендації  
до виконання курсової роботи  
**«Габаритний та світлоенергетичний розрахунок оптичної системи»**  
з навчальної дисципліни  
**«ФОТОМЕТРІЯ»**

*(для студентів 3 курсу денної та 4 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології фахового спрямування «Світлотехніка і джерела світла» та за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.*

Укладачі:

**ОВЧИННИКОВ** Станіслав Степанович  
**ПОЛІЩУК** Валентина Миколаївна  
**ПЕТЧЕНКО** Гліб Олександрович

Відповідальний за випуск *Ю. О. Васильєва*  
*За авторською редакцією*  
Комп'ютерне верстання *А. С. Лісовікова*

План 2019, поз. 214М

Підп. до друку 21.03.2019.    Формат 60×84/16  
Друк на ризографі    Ум. друк. арк. 0,8  
Тираж 100    Зам. № \_\_\_\_\_

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.

