

**Лабораторна робота №7**  
**ФОТОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**  
**НЕКОГЕРЕНТНИХ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ**

*Мета роботи:* ознайомитися з енергетичними та світловими характеристиками випромінювання та їхніми взаємозв'язками; виміряти спектральну густину освітленості предмета залежно від довжини хвилі у видимій області спектра; знайти енергетичну освітленість, енергетичний потік і коефіцієнт перетворення електричної потужності лампи розжарення; перевірити залежність освітленості від відстані, на якій реєструють світло; визначити кутовий розподіл випромінювання світлодіода.

*Обладнання:* лампа розжарення, світлодіод, фотодіод, монохроматор, люксметр, лінійка, кутовий вимірювальний пристрій.

### 1. Основні фотометричні характеристики

У будь-якому оптоелектронному пристрої завжди наявне джерело випромінювання. Джерелом може бути сам досліджуваний об'єкт, якщо він світиться, або джерело може опромінювати деякий об'єкт. Розглянемо ті характеристики, якими описують джерела та їхнє випромінювання.

Одна з головних енергетичних величин, які характеризують джерела випромінювання, – це *енергетичний потік*  $\Phi_e$  випромінювання. Це середня потужність, яку переносить оптичне випромінювання за великі часи  $\Delta t$ , які набагато більші за період  $T$  електромагнітних коливань. Оскільки ці періоди становлять  $T \sim 2 \times 10^{-15}$  с, то йдеться про звичайні часи  $\Delta t$  порядку секунд або годин. Потік випромінювання за своєю суттю є потужністю, а тому його вимірюють у ватах (Вт).

*Енергетична освітленість*  $E_e$  – це відношення потоку випромінювання, що падає на деякий елемент поверхні предмета, до площі цього елемента  $dS$ :

$$E_e = d\Phi_e / dS \text{ [Вт} \cdot \text{м}^{-2}\text{]}. \quad (2)$$

Найпростіший вид випромінювання – монохроматичне з безмежно вузьким інтервалом довжин хвиль (від  $\lambda$  до  $(\lambda + \Delta\lambda)$  за умови, що  $\Delta\lambda \rightarrow 0$ ). Якщо випромінювання немонохроматичне, то потрібно додатково з'ясувати розподіл випромінювання за довжинами хвиль. Тоді спектральний склад світла від джерела описують *спектральною густиною енергетичного потоку*  $\Phi_e(\lambda)$ . Величину  $\Phi_e(\lambda)$  визначають як відношення енергетичного потоку, взятого для безмежно малого інтервалу довжин хвиль, до ширини інтервалу довжин хвиль. Добуток  $\Phi_e(\lambda)d\lambda$  визначає потужність, яку переносить світло в інтервалі довжин хвиль  $d\lambda$ . Отже,

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda \text{ [Вт]}. \quad (1)$$

Аналогічно визначають *спектральну густину енергетичної освітленості*  $E_e(\lambda) = E_{e\lambda}$ :

$$E_e = \int_0^{\infty} E_{e\lambda} d\lambda, \quad E_{e\lambda} = dE_e / d\lambda. \quad (3)$$

Крім потоку випромінювання та освітленості, додатково визначають такі фотометричні характеристики джерел світла як *поверхнева густина енергетичного потоку*  $M_e$ , *енергетична сила*  $I_e$  світла в деякому напрямку та *енергетична яскравість*  $L_e$  світної поверхні в деякому напрямку (див. Додаток 1).

Людське око неоднаково чутливе до випромінювання різних довжин хвиль, а це означає, що об'єктивних енергетичних параметрів джерела замало для оцінювання дії світла. Інакше кажучи, іноді дію світла треба оцінювати не за його енергетичними характеристиками, а за світловим відчуттям, тобто за реакцією людського ока на дію світлового потоку. Тоді від *енергетичних величин* переходять до *світлових величин*. Наприклад, від *енергетичного потоку* (позначення  $\Phi_e$ ) можна перейти до *світлового потоку* (позначення  $\Phi_v$ ). Світловий потік  $\Phi_v$  вимірюють в одиницях, які називають *люменами* (лм).

Можна ввести й інші світлові величини. Наприклад, від *енергетичної освітленості*  $E_e$  переходять до *фотометричної освітленості*  $E_v$ , яка є відношенням світлового потоку  $d\Phi_v$ , що проходить крізь деяку малу площу  $dS$  освітлюваного предмета, до цієї площі:

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \text{ [лк]}. \quad (4)$$

Освітленість вимірюють у *люксах* (лк). Якщо джерело однаково випромінює світло у всіх напрямках, а сам предмет перебуває на деякій відстані  $r$  від точкового джерела, то повний потік  $\Phi_e$  пов'язаний з освітленістю  $E_v$  так:

$$\Phi_v = 4\pi r^2 E_v, \quad (5)$$

де  $S$  – це площа сфери з радіусом  $r$  ( $S = 4\pi r^2$ ).

Окрім освітленості, часто вводять ще *спектральну густина освітленості* (або скорочено *спектральну освітленість*)  $E_{v\lambda}$ :

$$E_{v\lambda} = dE_v / d\lambda \text{ [лк/нм]}. \quad (6)$$

Одиниця її вимірювання – це люкс, поділений на нанометр (лк/нм).

Позначимо потік випромінювання у безмежно малому діапазоні довжин хвиль  $\lambda \div (\lambda + \Delta\lambda)$  для деякого джерела як  $\Phi_{e\lambda}$ , а світловий потік, що сприймається оком у тому ж діапазоні, як  $\Phi_{v\lambda}$ . Тобто,  $\Phi_{e\lambda}$  і  $\Phi_{v\lambda}$  – це *спектральна густина енергетичного потоку* і *спектральна густина світлового потоку*. Їхнє відношення називають *спектральною світловою ефективністю*:

$$k_\lambda = k(\lambda) = \Phi_{v\lambda} / \Phi_{e\lambda}. \quad (7)$$

Очевидно, що  $k_\lambda$  – це деяка функція довжини хвилі; вона має максимум  $k_m$  на деякій довжині хвилі  $\lambda_m$  ( $k_m = k$  при  $\lambda = \lambda_m$ ). Для людського ока цей максимум маємо для зеленого світла посередині видимого діапазону ( $\lambda_m \approx 0,56$  мкм). Відношення  $k_\lambda$  до цього максимального значення  $k_m$  називають *спектральною світловою чутливістю*:

$$V_\lambda = V(\lambda) = k_\lambda / k_m. \quad (8)$$

Очевидно, що величина  $V_\lambda$  може змінюватися в межах від нуля до одиниці. Часто криву  $V_\lambda$  називають ще *кривою спектральної чутливості людського ока*, або *кривою видності*.

Максимальний параметр  $k_m$ , за яким встановлюють зв'язок між енергетичним і світловим потоками на довжині хвилі  $\lambda_m$ , називають ще *світловим еквівалентом енергетичного потоку*. Його числове значення дорівнює  $k_m = 683 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

Якщо енергетичний потік визначають формальним інтегруванням певної спектральної густини за будь-якими (додатними) довжинами хвиль ( $\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda$ ), то для світлового потоку можна обмежитися лише тим діапазоном довжин хвиль, у якому чутливе людське око:

$$\Phi_v = \int_{0.40}^{0.76} K_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda, \quad (9)$$

або

$$\Phi_v = 683 \int_{0.40}^{0.76} V_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda. \quad (10)$$

Тут довжини хвиль 0,40 мкм і 0,76 мкм у межах інтегрування орієнтовно збігаються з межами сприйняття видимого світла людським оком.

Завершуючи теоретичний вступ, розглянемо одне теоретичне питання, яке має надзвичайно важливі практичні наслідки. Нехай джерело випромінювання *точкове*. Точковим можна вважати джерело, якщо його розміри справді зникаюче малі, або якщо ці розміри й не малі в абсолютному вимірі, проте вони малі, порівняно з розмірами та масштабами нашої системи (наприклад, порівняно з розмірами предмета або порівняно з відстанню від джерела до предмета).

Інтуїтивно зрозуміло, що при віддаленні предмета від точкового джерела світла освітленість предмета зменшується. Постає питання: якою саме математичною формулою потрібно описати залежність освітленості від відстані, на якій предмет перебуває від джерела?

Нехай джерело випромінювання точкове і, до того ж, світить однаково в усіх напрямках. Більшість джерел на зразок лампи розжарення задовольняє останню умову. Тоді світло від джерела йде рівномірно по всіх радіальних напрямках і на деякій відстані  $r$  випромінювання рівномірно розповсюджується по всій площі  $S = 4\pi r^2$  сфери з цим радіусом. Чим далі предмет від джерела, тим меншу частку площі цієї сфери він займає. Нескладно здогадатися, що освітленість  $E$  предмета обернено пропорційна до квадрата відстані  $r$  від джерела до цього предмета:

$$E \sim 1/r^2. \quad (11)$$

Формула (11) математично формулює т. зв. *закон обернених квадратів*. Цей закон описує закономірності зменшення освітленості предмета від будь-якого типу випромінювання, незалежно від його природи. Формула (11) правильна, наприклад, для видимого світла, для хвиль НВЧ-діапазону, які широко використовують у сучасних телекомунікаціях і зв'язку, або для таких край шкідливих для здоров'я людини типів випромінювання як X-випромінювання або радіоактивне гамма-випромінювання.

Формула (11) одночасно «підказує» один із можливих шляхів захисту від небажаного (або шкідливого) опромінення: треба всього лише перебувати на значній відстані від джерела. Розглянемо для прикладу послаблення НВЧ-випромінювання,

абсолютно точних і переконливих даних про повну нешкідливість якого на сьогодні немає, – усе залежить від часу перебування організму людини під дією цього випромінювання, від його енергії та потужності і т. ін. Якщо збільшити відстань між джерелом випромінювання (наприклад, передавальною антеною мобільного телефону) та людиною (або деяким її життєво важливим органом – наприклад, головою) від 1 см до 1 м, то освітленість послабиться в  $(100/1)^2 = 10\,000$  разів! Навіть послаблення на якихось 10% або 50% зазвичай вважають успіхом; тут же фактично йдеться про те, що ми повністю позбулися випромінювання! Якісно така ж ситуація матиме місце для випромінювання Wi-Fi-маршрутизатора (роутера): перемістивши його з однометрової відстані на віддаль 10 м від місця, де ми переважно сидимо, одержуємо послаблення випромінювання в 100 разів. Схожі міркування стосуються перебування поблизу телекомунікаційної вежі тощо.

## 2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

**I. Знайти енергетичну освітленість на деякій відстані  $r$  від лампи розжарення до люксметра і визначити коефіцієнт перетворення електричної потужності лампи на потужність світлового випромінювання**

1. Ознайомитися з люксметром – приладом для вимірювання освітленості.
2. Розмістити на оптичній лаві освітлювач (лампу розжарення потужністю  $W = 100$  Вт), збиральну лінзу, монохроматор і люксметр (рис. 1).

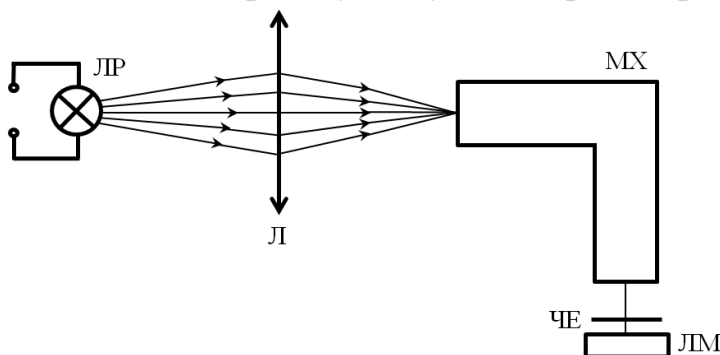


Рис. 1. Схема установки для вимірювання освітленості залежно від довжини хвилі світла: ЛР – лампа розжарення; Л – лінза; МХ – монохроматор; ЛМ – люксметр; ЧЕ – чутливий елемент люксметра.

3. За допомогою лінзи Л сфокусувати світлові промені від джерела світла (лампи розжарення ЛР) на входній щілині монохроматора МХ. Монохроматор виділяє із неперервного спектра хвилі з певними довжинами  $\lambda$ . Ці хвилі через вихідну щілину потрапляють на чутливий фотоелемент ЧЕ люксметра ЛМ, який перетворює світло на електричний сигнал. Електричний сигнал фіксують пристроєм реєстрування люксметра. Оскільки монохроматор щоразу виділяє дуже малу ділянку довжин хвиль світла, то замість освітленості  $E_v$  експериментально ми фактично вимірюємо спектральну густину освітленості  $E_{v\lambda}$ . Її одиниця вимірювання – це лк/нм.

Нарешті, на монохроматорі безпосередньо немає шкали довжини хвиль – натомість ми працюємо зі шкалою, на якій позначено деякі кути  $\varphi$  на поворотному барабані приладу. Для переведення кутів  $\varphi$  на барабані монохроматора у довжину хвилі  $\lambda$  треба скористатися таблицею Додатка 3 до цієї лабораторної роботи.

4. Виміряти значення спектральної освітленості  $E_{\nu\lambda}$  [лк/нм] від лампи розжарення при різних довжинах хвилі  $\lambda$  [нм] у видимій області спектра (400–700 нм) із кроком 10 нм. Дані вимірювань занести в таблицю 1.

5. Обрати один зі стандартних програмних пакетів для чисельного аналізу даних і наукової графіки, а також ознайомитися з цим пакетом. Подані конкретні вказівки та ілюстрації роботи стосуються програмного пакета Origin. У разі його обрання необхідно перенести результати виконаних вимірювань  $E_{\nu\lambda}(\lambda)$  у таблицю Origin (тобто в табл. 2).

Таблиця 1

Таблиця для занесення результатів вимірювань спектральної освітленості  $E_{\nu\lambda}$  від лампи розжарення залежно від довжини хвилі  $\lambda$  у видимій області спектра

$\lambda$ , нм	$E_{\nu\lambda}$ , лк/нм
400	
410	
420	
...	
690	
700	

Таблиця 2

Таблиця програми Origin для перенесення результатів вимірювання з таблиці 1

	A(X)	B(Y)
Long Name	$\lambda$	$E_{\nu\lambda}$
Units	nm	lx/nm
Comments		
1	400	...
2	410	...
3	420	..
...	...	...
29	690	...
30	700	...

6. Побудувати графік залежності спектральної освітленості  $E_{\nu\lambda}$  від довжини хвилі  $\lambda$ , використовуючи таку послідовність пунктів меню програми Origin: Plot → Symbol → Scatter. У діалоговому вікні (див. рис. 2) колонкам (Column) присвоїти значення X і Y.

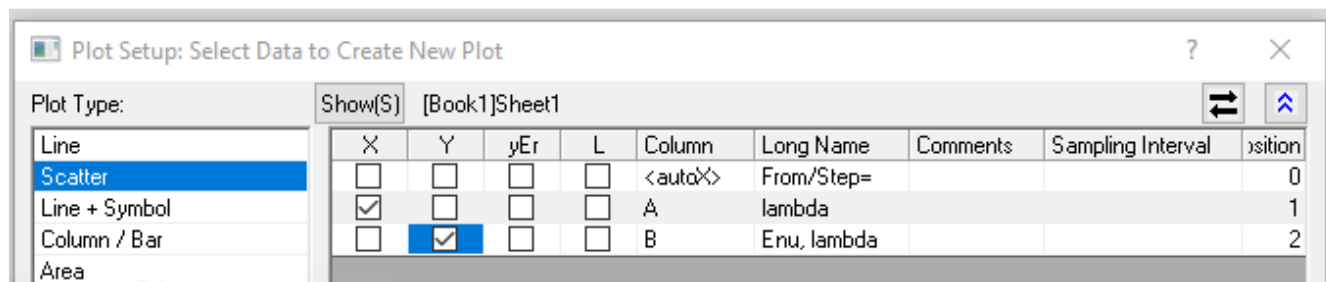


Рис. 2. Діалогове вікно програмі Origin для вибору даних і побудови графіка  $E_{\nu\lambda}(\lambda)$ .

Приклад графіка залежності  $E_{\nu\lambda}(\lambda)$ , зображений на рис. 3, свідчить, що спектральна чутливість люксметра збігається з чутливістю ока.

7. За аналогією до формули (9), загальну освітленість  $E_{\nu}$  від лампи розжарення можна обчислити як визначений інтеграл від функції  $E_{\nu\lambda}$ :

$$E_{\nu} = \int_{400}^{700} E_{\nu\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (12)$$

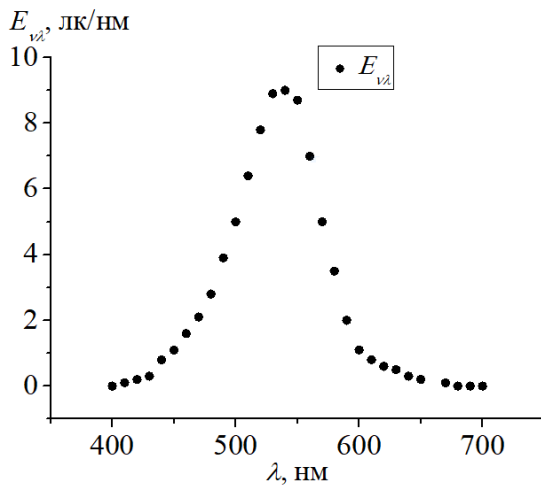


Рис. 3. Приклад графіка залежності спектральної освітленості  $E_{v\lambda}$  лампи розжарення від довжини хвилі  $\lambda$  у видимій області спектру. Експериментальний графік будують у вигляді точок, які не потрібно з'єднувати лініями – ці лінії не мають жодних реальних відповідників!

Нагадаємо геометричний зміст визначеного інтеграла. *Визначений інтеграл* – це інтеграл функції  $f(x)$  із вказаними межами інтегрування  $a$  і  $b$ . Чисельно значення визначеного інтеграла дорівнює площі  $s$  криволінійної фігури, обмеженої віссю абсцис, двома вертикальними прямими на кінцях відрізка  $ab$  (прямими  $x = a$  і  $x = b$ ) і кривою графіка функції  $f(x)$  (див. рис. 4):

$$s = \int_a^b f(x) dx. \quad (13)$$

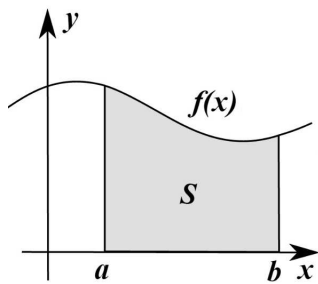


Рис. 4. Геометричний зміст визначеного інтеграла.

Отже, загальна освітленість  $E_v$  дорівнює площі під графіком  $E_{v\lambda}(\lambda)$ . Для визначення цієї площі в програмі Origin потрібно використати таку послідовність пунктів меню: Analysis → Mathematics → Integrate. У таблиці 2 з'явиться додаткова колонка з назвою Mathematical Integral Area. Шукане нами значення площі розміщене в останній комірці цієї колонки, якій задовольняє останнє значення  $\lambda = 700$  нм.

**8.** На жаль, знайдені попередньо дані  $E_{v\lambda}$  і  $E_v$  не можна безпосередньо використати для подальших розрахунків. Для цього потрібні дані  $E'_v$  і  $E'_{v\lambda}$ , які стосуються деякої визначеної відстані  $r$  між джерелом світла і чутливим елементом люксметра. Величину  $E'_v$  можна легко знайти, посвітивши джерелом прямо на люксметр і зчитавши його покази на відстані  $r$  від джерела. Проте за цих умов (тобто без монохроматора) неможливо знайти потрібну нам спектральну характеристику  $E'_{v\lambda}$ .

Для вирішення цієї суперечності чинять так: знаходять освітленість  $E'_v$  від лампи розжарення на відстані  $r$  [м] від нитки розжарення лампи до чутливого елемента люксметра. Відстань  $r$  задає викладач.

Далі визначають коефіцієнт пропорційності  $k_0$  між  $E'_v$  і  $E_v$  за формулою

$$k_0 = E'_v / E_v. \quad (14)$$

9. Усі значення  $E_{v\lambda}$  домножити на  $k_0$  і таким чином одержати залежність спектральної освітленості  $E'_{v\lambda}(\lambda)$  на відстані  $r$  від джерела світла.

Для цього створити в табл. 2 нову колонку, клікнувши правою клавiшею мишки на вільному місці екрана справа від таблиці та обравши з випадаючого меню опцію Add New Column. Нову колонку також можна створити за допомогою комбiнації клавiш Ctrl+D. У цій колонці розрахувати значення:

$$E'_{v\lambda} = k_0 E_{v\lambda}. \quad (15)$$

Для цього клікнути лівою клавiшею мишки по назві колонки, колонка виділиться чорним кольором. Клікнувши правою клавiшею мишки по колонці, викликати випадаюче меню, з якого обрати опцію Set Column Values. У діалоговому вікні присвоїти колонці значення відповідно до формули (15) (див. рис. 5).

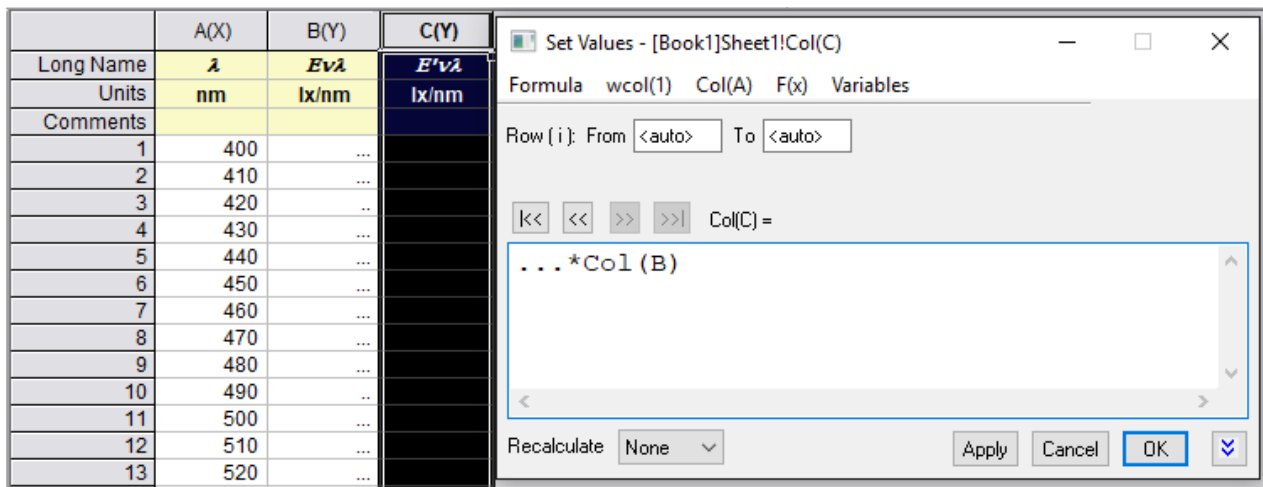


Рис. 5. Діалогове вікно присвоєння колонці C(Y) значення  $k_0 E_{v\lambda}$  (замість трьох крапок потрібно вписати значення  $k_0$ , розраховане за формулою (14)).

## 10. Побудувати графік залежності $E'_{v\lambda}(\lambda)$ .

Зазначимо, що інтеграл  $\int_{400}^{700} E'_{v\lambda}(\lambda) d\lambda$ , тобто площа під кривою  $E'_{v\lambda}(\lambda)$ , дорівнюватиме значенню  $E'_{vs}$  знайденому в пункті 8.

Підкреслимо також, що для знаходження інтеграла функції в програмі Origin не обов'язково будувати графік цієї функції. Достатньо в таблиці Origin виділити колонку або ту частину колонки, куди раніше було занесено значення функції, потрібні для знаходження інтеграла. Далі використовують такі пункти меню: Analysis → → Mathematics → Integrate. Як аргумент програма сама обере колонку A(X) або ту її частину, що задовольняє виділеній частині колонки зі значеннями функції.

11. За допомогою таблиці спектральної залежності спектральної світлової ефективності  $k_\lambda = k(\lambda)$  [лк/(Вт/м<sup>2</sup>)] для видимої області спектра, наведеної в Додатку 2, перейти від спектральної освітленості  $E'_{v\lambda}(\lambda)$  [лк/нм] до спектральної густини енергетичної освітленості  $E_{e\lambda}(\lambda)$  [Вт/(м<sup>2</sup> нм)] за формулою

$$E_{e\lambda} = E'_{v\lambda} / k_\lambda. \quad (16)$$

Значення спектральної світлової ефективності  $k_\lambda = k(\lambda)$  подане в таблиці з Додатка 2, а сам графік залежності  $k(\lambda)$  для наочності зображено на рис. 6.

Для переходу від світлової характеристики  $E'_{v\lambda}(\lambda)$  до енергетичної характеристики  $E_{e\lambda}(\lambda)$  у табл. 2 створюють дві нові колонки. В одну із них переносять із таблиці Додатка 2 значення  $k_\lambda$  з діапазону довжин хвиль 400–700 нм, а другій колонці присвоюють значення за формулою (16).

**12.** Знайти енергетичну освітленість  $E_e$  від лампи розжарення на відстані  $r$ , обчисливши інтеграл

$$E_e = \int_{400}^{700} E_{e\lambda} d\lambda. \quad (17)$$

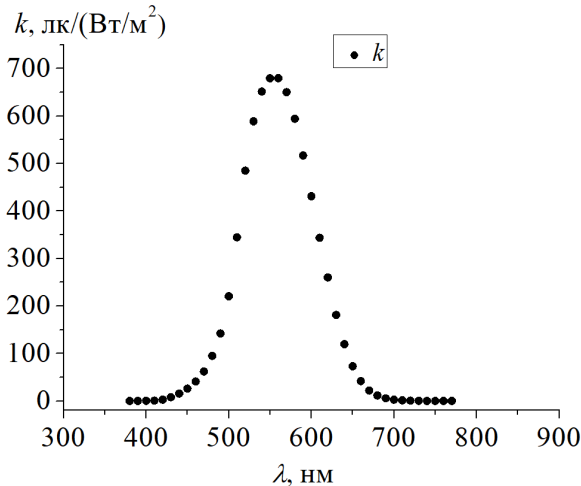


Рис. 6. Залежність спектральної світлової ефективності  $k(\lambda) = k_\lambda$  від довжини хвилі світла.

Для цього побудувати графік залежності  $E_{e\lambda}(\lambda)$  і розрахувати площу  $E_e$  під цим графіком. Приклад графіка  $E_{e\lambda}(\lambda)$ , зображений на рис. 7, засвідчує, що спектральна залежність об'єктивної (тобто енергетичної) освітленості істотно відрізняється від спектральної освітленості, яку сприймає людське око (порівн. із рис. 3). Зокрема, залежність  $E_{e\lambda}(\lambda)$  майже монотонна та не має максимуму при  $\lambda_m \approx 0,56$  мкм.

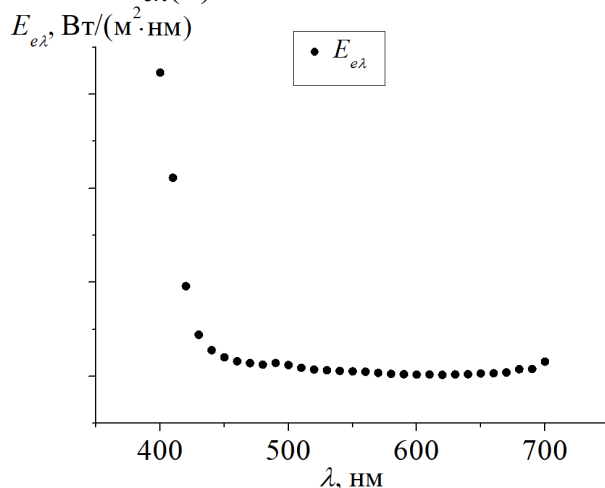


Рис. 7. Приклад графіка залежності спектральної густини енергетичної освітленості  $E_{e\lambda}$  для лампи розжарення від довжини хвилі  $\lambda$  у видимій області на відстані  $r$  від джерела світла.

**13.** Визначити загальний потік випромінювання  $\Phi_e$  за формулою (6):

$$\Phi_e = 4\pi r^2 E_e, \quad (18)$$

де  $4\pi r^2$  – це площа сфери з радіусом  $r$ .

**14.** Оскільки енергетичний потік випромінювання  $\Phi_e$  від лампи розжарення фактично дорівнює оптичній потужності лампи, то коефіцієнт перетворення  $\mu$  електричної потужності лампи розжарення  $W$  на енергетичний потік випромінювання  $\Phi_e$  можна визначити за формулою:



$$\mu = \Phi_e / W. \quad (19)$$

Для електричної потужності лампи розжарення треба взяти значення  $W = 100$  Вт.

Наголосимо, що коефіцієнт корисної дії ламп розжарення доволі низький, а тому коефіцієнт  $\mu$  істотно менший за одиницю (або за 100%).

## II. Знайти залежність освітленості $E_v$ від відстані $r$ між джерелом і люксметром

1. Розмістити на оптичній лаві джерело світла і люксметр (рис. 5).

2. Виміряти освітленість  $E_v$  для п'яти відстаней  $r$  від середини нитки розжарення лампи до чутливого елемента люксметра. Відстані задає викладач. Дані вимірювань занести в Таблицю 3 (зауважимо, що всі таблиці для зручності наведено в Додатку 4).

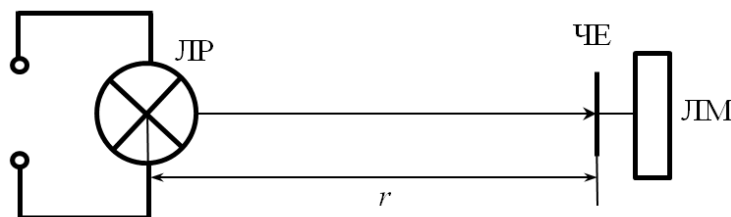


Рис. 8. Схема установки для вивчення залежності освітленості  $E_v$  предмета від його відстані  $r$  до джерела світла: ЛР – джерело світла (лампа розжарення); ЛМ – люксметр; ЧЕ – чутливий елемент люксметра.

$r$ , м	$E_v$ , лк

Таблиця 3  
Таблиця для результатів вимірювань освітленості  $E_v$  від лампи розжарення залежно від її відстані  $r$  до чутливого елемента люксметра

3. Перенести дані з табл. 3 у таблицю Origin; в окремій колонці розрахувати значення  $1/r^2$  і побудувати графік залежності  $E_v(1/r^2)$ . Якщо графік виявиться прямолінійним, то параметр  $E_v$  і справді обернено пропорційний до квадрата відстані  $r$ .

Зауважте, що навіть без вимірювань зрозуміло, що на відстані  $r \rightarrow \infty$  маємо  $E_v \rightarrow 0$ . Отже, у Вас фактично є ще одна точка:  $r \rightarrow \infty$ ,  $1/r^2 = 0$ ,  $E_v = 0$ ! Цю точку теж потрібно відобразити на графіку. Приклад графіка залежності освітленості  $E_v$  від величини, обернено пропорційної до квадрата відстані  $r$  від чутливого елемента люксметра до джерела світла, подано на рис. 9.

Доцільно перевірити, наскільки добре експериментальні точки можливо описувати теоретичною формулою (11)  $E_v \sim 1/r^2$ . У нашому випадку для цього необхідно апроксимувати залежність  $E_v(1/r^2)$  на рис. 9 прямою лінією. У меню Origin треба поступово обрати такі пункти меню для оброблення графіка: Analysis -> Fitting -> Linear Fit. Програма побудує апроксимуючу пряму лінію, яка буде проходити якомога ближче до всіх експериментальних точок на підставі відомого алгоритму най-

менших квадратів. «Якість» апроксимації перевіримо за коефіцієнтом кореляції Пірсона  $R$  («Pearson's  $r$ »), який можна знайти в таблиці Origin із чисельними підсумками апроксимації. Якщо маємо  $R \approx 0,99$  або вище, то точність нашого експерименту висока, а освітленість справді обернено пропорційна квадрату відстані між джерелом і предметом. Якщо ж маємо протилежну ситуацію, швидше за все, експериментальні дані одержано з помилками або результати їхнього чисельного оброблення містять помилки.

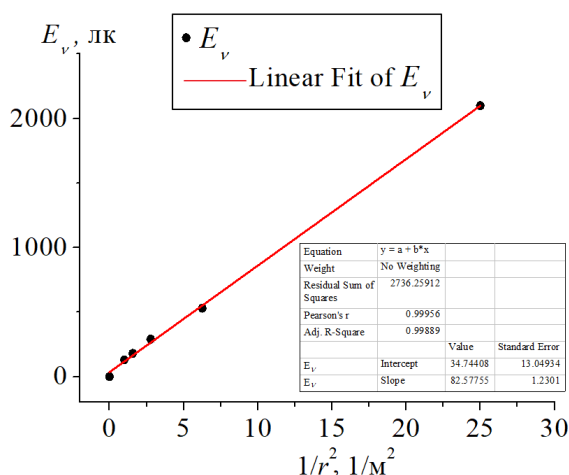


Рис. 9. Приклад графіка залежності  $E_v$  від  $1/r^2$  для лампи розжарення.

### III. Дослідити кутовий розподіл освітленості від світлодіода

1. Установити кутовий вимірювальний пристрій на оптичній лаві, а на ньому розмістити світлодіод як джерело випромінювання. Встановити фотодіод, який використовують для реєстрування світла (рис. 10).

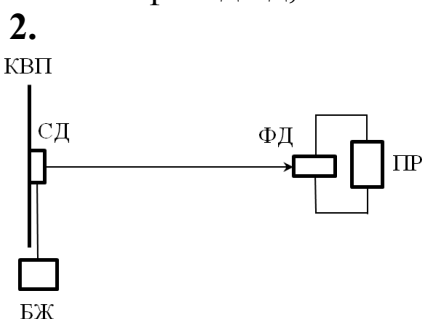


Рис. 10. Схема установки для вивчення просторового розподілу освітленості світлодіода: СД – світлодіод; КВП – кутовий вимірювальний пристрій; БЖ – блок живлення; ФД – фотодіод; ПР – пристрій реєстрування (амперметр).

2. За допомогою амперметра виміряти значення сили струму  $I$  на фотодіоді [мкА]. Величина  $I$  прямо пропорційна до освітленості  $E_v$ .

$\alpha, ^\circ$	$I, \text{мкА}$
0	
5	
10	
...	
85	
90	

Таблиця 4

Таблиця для результатів вимірювання сили струму  $I$  на фотодіоді (пропорційна до освітленості світлодіода  $E_v$ ) залежно від кута повороту  $\alpha$  кутового вимірювального пристрою

Long Name	$\alpha$	$I(Ev)$
Units	°	mkA
Comments		
1	0	...
2	5	...
3	10	...
...	...	...
35	170	...
36	175	...
37	180	...

Таблиця 5

Таблиця Origin для перенесення результатів вимірювань із табл. 4

3. Повертаючи при нерухомому фотодіоді освітлювач з кроком  $\Delta\alpha = 3^\circ$  у діапазоні  $\alpha$  від  $-40^\circ$  до  $+40^\circ$ , визначити освітленості  $I(\alpha)$  для всіх кутів  $\alpha$ . Початкову орієнтацію кутового вимірювального пристрою, при якій кут  $\alpha = 0^\circ$ , задає викладач.

Занести результати вимірювання в табл. 4.

4. Перенести дані вимірювань в таблицю Origin (див. табл. 5).

5. Побудувати діаграму направленості світлового випромінювання  $I(\alpha)$  світлодіода у *полярній системі координат*. Коротко опишемо систему координат. Полярна система містить точку  $O$  (*полюс*) і промінь (*полярну вісь*), який виходить із точки  $O$ . Координати точки на площині задають полярним кутом  $\alpha$  і полярним радіусом  $r$ . *Полярний радіус*  $r$  – це відстань від точки до полюса  $O$ , а *полярний кут*  $\alpha$  – це кут, на який потрібно повернути полярну вісь проти годинникової стрілки, щоб потрапити в цю точку (див. рис. 11).

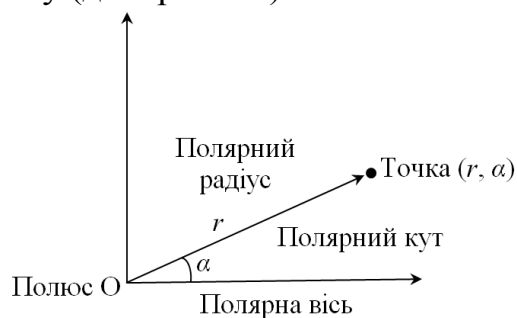


Рис. 11. Точка з координатами  $r$  і  $\alpha$  у полярній системі координат.

Координатними лініями в полярній системі координат є концентричні кола, які збігаються з полярними радіусами  $r$ , а також промені, які відповідають полярним кутам  $\alpha$ . Тому полярна система координат має вигляд полярної сітки (рис. 12).

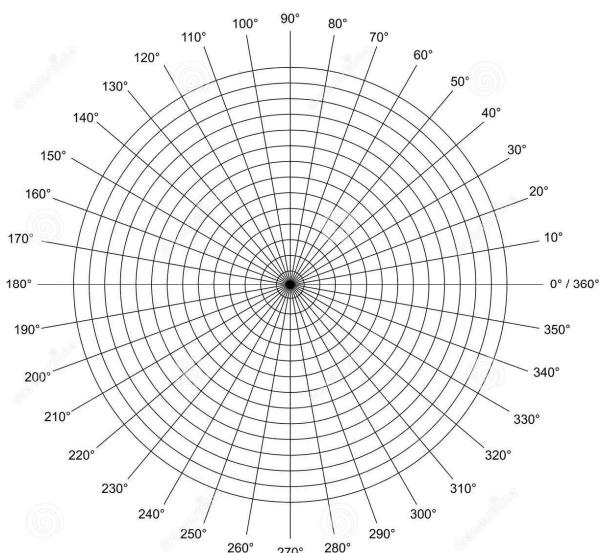


Рис. 12. Координатні лінії у полярній системі координат у вигляді полярної сітки.

Для побудови діаграми направленості світлового випромінювання  $I(\alpha)$  світлодіода у *полярній системі координат* використати таку послідовність пунктів меню: Plot -> Specialized -> Polar Theta (X) r(Y) (див. рис. 13).

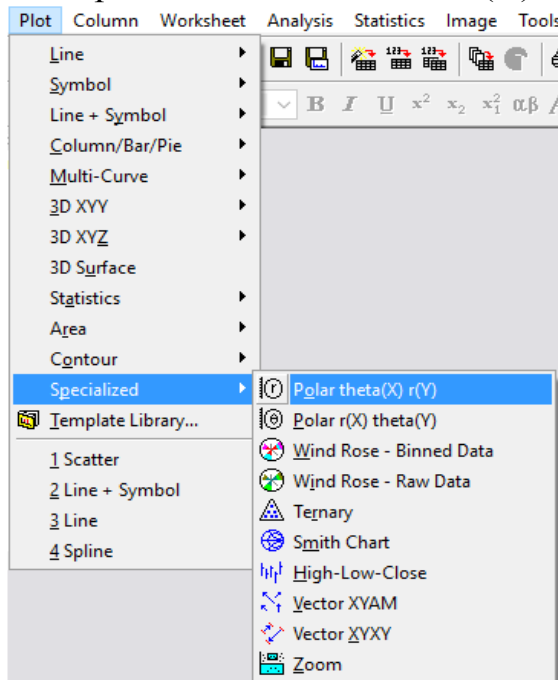


Рис. 13. Пункти меню програми Origin для побудови графіка у полярній системі координат.

У діалоговому вікні вибрати тип графіка Scatter і присвоїти значення X і Y колонкам (див. рис. 14).

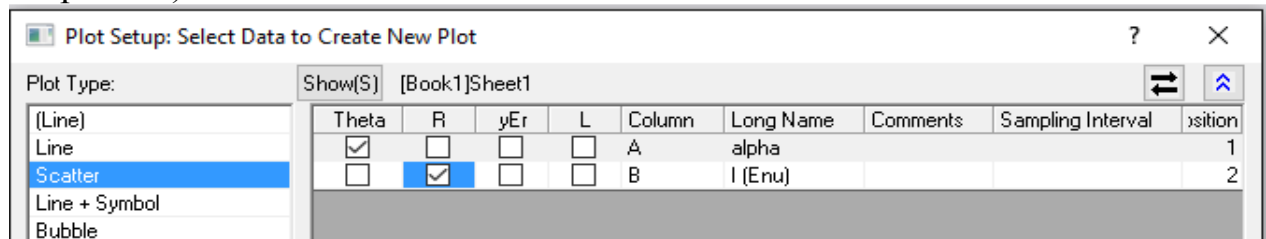


Рис. 14. Діалогове вікно вибору даних для побудови експериментального графіка  $I(\alpha)$  у полярній системі координат.

Приклад діаграми направленості світлового випромінювання  $I(\alpha)$  світлодіода у *полярній системі координат* зображено на рис. 15. Очевидно, що світлодіод не випромінює рівномірно в усі боки; навпаки, його випромінювання зосереджене в порівняно вузькому діапазоні кутів, який приблизно визначають з графіка.

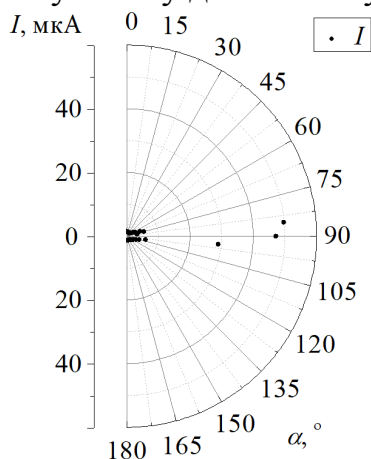


Рис. 15. Приклад діаграми направленості світлового випромінювання  $I(\alpha)$  світлодіода.

### Додаток 1

Основні енергетичні і світлові величини (відповідно до системи СІ та Міжнародного світлотехнічного словника)

Енергетична величина			Світлова величина		
Назва	Формула	Одиниця вимірювання	Назва	Формула	Одиниця вимірювання
Потік випромінювання	$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda$	Вт	Світловий потік	$\Phi_v = K_{\lambda m} \int_0^{\infty} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda$	лм
Енергія випромінювання	$Q_e = \int_0^t \Phi_e(t) dt$	Дж	Світлова енергія	$Q_v = \int_0^t \Phi_v(t) dt$	лм·с
Енергетична сила світла	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Вт·ср <sup>-1</sup>	Сила світла	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	кд
Поверхнева густина потоку випромінювання	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS_1}$	Вт·м <sup>-2</sup>	Світність	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS_1}$	лм·м <sup>-2</sup>
Енергетична освітленість	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS_2}$	Вт·м <sup>-2</sup>	Освітленість	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS_2}$	лк
Енергетична яскравість	$L_{e\theta_1} = \frac{dI_{e\theta_1}}{dS_1 \cos\theta_1}$	Вт·м <sup>-2</sup> ·ср <sup>-1</sup>	Яскравість	$L_{v\theta_1} = \frac{dI_{v\theta_1}}{dS_1 \cos\theta_1}$	кд·м <sup>-2</sup>
Енергетична кількість світла	$H_e = \int_0^t E_e(t) dt$	Дж·м <sup>-2</sup>	Кількість світла	$H_v = \int_0^t E_v(t) dt$	лк·с

Примітка: індексом 1 позначені ті площі  $S$  і кути  $\theta$ , що стосуються джерела випромінювання, а індексом 2 – ті, що стосуються освітлюваного предмета.

## Додаток 2

Значення спектральної світлової ефективності залежно від довжини хвилі світла

$\lambda$ , нм	$k$ , лк/(Вт/м <sup>2</sup> )
380	0,027
390	0,082
400	0,270
410	0,826
420	2,732
430	7,923
440	15,709
450	25,954
460	40,980
470	62,139
480	94,951
490	142,078
500	220,609
510	344,549
520	484,930
530	588,746
540	651,582
550	679,551
555	683,000
560	679,585
570	650,216
580	594,210
590	517,031
600	430,973
610	343,549
620	260,223
630	180,995
640	119,525
650	73,081
660	41,663
670	21,856
680	11,611
690	5,607
700	2,802
710	1,428
720	0,715
730	0,355
740	0,170
750	0,082
760	0,041
770	0,020

### Додаток 3

Зв'язок між довжиною хвилі  $\lambda$  і кутовою мірою  $\varphi$  барабана монохроматора

$\lambda$ , нм	$\varphi$ , град	$\lambda$ , нм	$\varphi$ , град	$\lambda$ , нм	$\varphi$ , град
400	509	710	2915	1030	3268
410	710	720	2937	1040	3274
420	920	730	2957	1050	3280
430	1080	740	2975	1060	3286
440	1218	750	2993	1070	3291
450	1347	760	3010	1080	3296
460	1473	770	3025	1090	3303
470	1593	780	3040	1100	3311
480	1704	790	3054	1110	3313
490	1806	800	3068	1120	3318
500	1900	810	3081	1130	3324
510	1983	820	3093	1140	3328
520	2059	830	3104	1150	3332
530	2130	840	3115	1160	3339
540	2197	850	3126	1170	3342
550	2261	860	3136	1180	3347
555	2290	870	3146	1190	3352
560	2320	880	3156	1200	3356
570	2378	890	3165	1210	3360
580	2432	900	3174	1230	3368
590	2485	910	3183	1250	3378
600	2536	920	3191	1270	3386
610	2583	930	3199	1290	3393
620	2629	940	3207	1310	3401
630	2670	950	3214	1330	3407
640	2710	960	3222	1350	3416
650	2746	970	3229	1400	3433
660	2780	980	3236	1450	3448
670	2811	990	3243	1500	3464
680	2840	1000	3249	1550	3480
690	2868	1010	3256	1600	3493
700	2892	1020	3262	1630	3500

## Додаток 4

### Робочі таблиці

<p style="text-align: center;">Таблиця для результатів вимірювання спектральної освітленості <math>E_{v\lambda}</math> лампи розжарення залежно від довжини хвилі <math>\lambda</math> у видимій області спектра</p> <table border="1" style="margin: 20px auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;"><math>\lambda</math>, нм</th> <th style="padding: 5px;"><math>E_{v\lambda}</math>, лк/нм</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>400</td><td></td></tr> <tr><td>410</td><td></td></tr> <tr><td>420</td><td></td></tr> <tr><td>430</td><td></td></tr> <tr><td>440</td><td></td></tr> <tr><td>450</td><td></td></tr> <tr><td>460</td><td></td></tr> <tr><td>470</td><td></td></tr> <tr><td>480</td><td></td></tr> <tr><td>490</td><td></td></tr> <tr><td>500</td><td></td></tr> <tr><td>510</td><td></td></tr> <tr><td>520</td><td></td></tr> <tr><td>530</td><td></td></tr> <tr><td>540</td><td></td></tr> <tr><td>550</td><td></td></tr> <tr><td>560</td><td></td></tr> <tr><td>570</td><td></td></tr> <tr><td>580</td><td></td></tr> <tr><td>590</td><td></td></tr> <tr><td>600</td><td></td></tr> <tr><td>610</td><td></td></tr> <tr><td>620</td><td></td></tr> <tr><td>630</td><td></td></tr> <tr><td>640</td><td></td></tr> <tr><td>650</td><td></td></tr> <tr><td>660</td><td></td></tr> <tr><td>670</td><td></td></tr> <tr><td>680</td><td></td></tr> <tr><td>690</td><td></td></tr> <tr><td>700</td><td></td></tr> </tbody> </table>	$\lambda$ , нм	$E_{v\lambda}$ , лк/нм	400		410		420		430		440		450		460		470		480		490		500		510		520		530		540		550		560		570		580		590		600		610		620		630		640		650		660		670		680		690		700		<p style="text-align: center;">Таблиця для результатів вимірювання освітленості <math>E_v</math> лампи розжарення залежно від її відстані <math>r</math> до чутливого елемента люксметра</p> <table border="1" style="margin: 20px auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;"><math>r</math>, м</th> <th style="padding: 5px;"><math>E_v</math>, лк</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Таблиця для результатів вимірювання сили струму на фотодіоді <math>I</math>, пропорційної освітленості світлодіода <math>E_v</math>, залежно від кута повороту <math>\alpha</math> кутового вимірювального пристрою</p> <table border="1" style="margin: 20px auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;"><math>\alpha</math>, град</th> <th style="padding: 5px;"><math>I</math>, мкА</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td></td></tr> <tr><td>25</td><td></td></tr> <tr><td>30</td><td></td></tr> <tr><td>35</td><td></td></tr> <tr><td>40</td><td></td></tr> <tr><td>45</td><td></td></tr> <tr><td>50</td><td></td></tr> <tr><td>55</td><td></td></tr> <tr><td>60</td><td></td></tr> <tr><td>65</td><td></td></tr> <tr><td>70</td><td></td></tr> <tr><td>75</td><td></td></tr> <tr><td>80</td><td></td></tr> <tr><td>85</td><td></td></tr> <tr><td>90</td><td></td></tr> </tbody> </table>	$r$ , м	$E_v$ , лк											$\alpha$ , град	$I$ , мкА	0		5		10		15		20		25		30		35		40		45		50		55		60		65		70		75		80		85		90	
$\lambda$ , нм	$E_{v\lambda}$ , лк/нм																																																																																																																				
400																																																																																																																					
410																																																																																																																					
420																																																																																																																					
430																																																																																																																					
440																																																																																																																					
450																																																																																																																					
460																																																																																																																					
470																																																																																																																					
480																																																																																																																					
490																																																																																																																					
500																																																																																																																					
510																																																																																																																					
520																																																																																																																					
530																																																																																																																					
540																																																																																																																					
550																																																																																																																					
560																																																																																																																					
570																																																																																																																					
580																																																																																																																					
590																																																																																																																					
600																																																																																																																					
610																																																																																																																					
620																																																																																																																					
630																																																																																																																					
640																																																																																																																					
650																																																																																																																					
660																																																																																																																					
670																																																																																																																					
680																																																																																																																					
690																																																																																																																					
700																																																																																																																					
$r$ , м	$E_v$ , лк																																																																																																																				
$\alpha$ , град	$I$ , мкА																																																																																																																				
0																																																																																																																					
5																																																																																																																					
10																																																																																																																					
15																																																																																																																					
20																																																																																																																					
25																																																																																																																					
30																																																																																																																					
35																																																																																																																					
40																																																																																																																					
45																																																																																																																					
50																																																																																																																					
55																																																																																																																					
60																																																																																																																					
65																																																																																																																					
70																																																																																																																					
75																																																																																																																					
80																																																																																																																					
85																																																																																																																					
90																																																																																																																					