

## Лабораторна робота №5

### ВИМІРЮВАННЯ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ ОБ'ЄКТИВІВ ФОТОКАМЕР ЗА ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМ МЕТОДОМ

*Мета роботи:* засвоїти фотоелектричну методику вимірювання фокусних відстаней; визначити фокусну відстань об'єктива фотокамери.

*Обладнання:* освітлювач з конденсором, кругла діафрагма, коліматорний об'єктив, фотооб'єктив, растровий модулятор з електродвигуном, фотоприймач, осцилограф, відліковий пристрій (вольтметр або мікроамперметр).

#### 1. Площина зображення об'єктива

Визначення положення найкращого зображення, утвореного об'єктивом фотокамери, – це одне з основних завдань у дослідженні якості об'єктива. Таке визначення дає змогу знайти оптимальні можливості об'єктива.

Припустимо, що об'єктив вільний від аберацій. Такі об'єктиви називають безабераційними. Відомо, що безабераційний об'єктив утворює зображення безмежно віддаленого предмета строго у *фокальній (гаусовій) площині*. У реальних об'єктів із залишковими абераціями *площиною найкращого зображення* безмежно віддаленої світлової точки (або *площиною найкращого встановлення*) прийнято вважати ту площину, в якій освітленість у центрі світлової плями зображення має найвище значення. Для об'єктивів із залишковими абераціями ця площина зазвичай не збігається з гаусовою площиною зображення, утвореного променями, які поширюються під незначними кутами до оптичної осі (т. зв. параксіальними променями). Не збігається вона і з площиною найменшого перетину геометричного пучка променів.

Вивчення розподілу освітленості в площині зображення світлової точки, а також у близьких перетинах пучка, паралельних до цієї площини, дає змогу точніше визначити площину найкращого зображення об'єктива. Для об'єктивів, які використовують у приладах візуального спостереження (візирах, прицілах тощо), у фотокамерах або відеокамерах, тобто для всіх об'єктивів, що створюють зображення, яке сприймають оком, площина найкращого зображення – це площина максимального контрасту, а не площина максимального розділення зображення предмета. Це пояснюється тим, що незначне зниження контрасту створює враження нерізкості зображення, а незначне пониження роздільної здатності практично не має значення за умови високого контрасту. Крім того, за умови візуального розгляду найважливіше передавання великих деталей зображення, а не дрібних, близьких за розмірами до межі розділення.

Якщо реальні об'єктиви мають аберації, то розподіл світлової енергії в зображенні залежить і від величини залишкових аберацій, і від спектрального складу джерела випромінювання. Розташування площини найкращого зображення може змінюватися залежно від приймача, який реєструє енергію світла в зображенні (фотоплівки, фоточутливої матриці фотокамери тощо). Це пов'язано з тим, що максимум яскравості центрального кружка для ока і для фотоприймача певного типу може розташовуватися дещо в різних площинах через відмінності в спектральній і контрастній чутливості ока та цих приймачів.

Отже, важлива умова знаходження площини найкращого зображення (надалі – просто *площини зображення*) реальних фотооб’єктивів полягає в тому, що реєструвати площину зображення треба, зазвичай, тим же приймачем, який застосовують разом з фотооб’єктивом.

## 2. Методика визначення площини зображення

Залежно від приймача, який фіксує площину зображення, розрізняють два головні методи визначення положення площини зображення: *візуальний* і *фотоелектричний*. Перший з них має низку недоліків. Серед них зазначмо суб’єктивність оцінки під час визначення положення площини зображення, тривалий час цього процесу та інші.

З розвитком оптоелектроніки та появою високочутливих фотоприймачів стало можливим фіксування площини зображення об’єктивними фотоелектричними методами, які не потребують участі ока під час оцінки результатів вимірювання. Фотоелектричний метод базується на перетворенні енергії потоку світлового випромінювання, яке проходить крізь досліджуваний об’єктив, на електричний сигнал. Зміна електричного сигналу за висотою (рівнем) пропорційна до освітленості світлового пучка, що створює зображення. За допомогою фотоелектричного методу визначення площини зображення фотооб’єктивів можна автоматизувати процес вимірювання. Нарешті, під час випробувань у невидимих ділянках спектра випромінювання фотоелектричний метод – один з небагатьох методів безпосереднього вимірювання.

Перш ніж перейти до розгляду конкретної схеми вимірювань, зупинімося на характері залежності освітленості в гомоцентричному пучку променів від величини розфокусування  $\Delta$ . Для цього використаємо формулу для освітленості  $E$  зображення точки на оптичній осі для безаберацийного об’єктива:

$$E = 4E_0 \sin[\pi(A\Delta)^2 / (2\lambda)] / [\pi(A\Delta)^2 / \lambda], \quad (1)$$

де  $E_0$  – освітленість у центрі перетину пучка променів фокальною площиною,  $A$  – середня величина розсіяння об’єктива.

На рис. 1 зображено зміну освітленості в центрі пучка гомоцентричних променів для різних значень розфокусування, одержану на підставі формули (1). Максимум освітленості відповідає фокальній площині зображення, утвореного безаберацийним об’єктивом. З віддаленням від цієї площини освітленість спадає, спостерігаємо також періодичну зміну світла та темряви вздовж осі світлового пучка.

Перший мінімум відповідає значенню  $\Delta = 2\alpha / A^2$ , наступний – значенню  $\Delta = 4\alpha / A^2$  тощо. На підставі залежності  $E = f(\Delta)$  і визначають площину зображення. У пучку променів, що створюють зображення (див. рис. 1), є одна площина з максимальною освітленістю. Це якраз *площина найкращого зображення*. Фотоелектричні прилади, принцип дії яких ґрунтується на вимірюванні освітленості вздовж оптичної осі, фіксують цю площину за максимальним сигналом.

Зміна освітленості поблизу площини зображення відбувається повільно, тому для підвищення чутливості схеми бажано користуватися двома симетричними точками на ділянках кривої залежності  $E = f(\Delta)$  з максимальною крутизною, тобто визначати площину зображення за двома симетричними площинами однакової нерізкості.

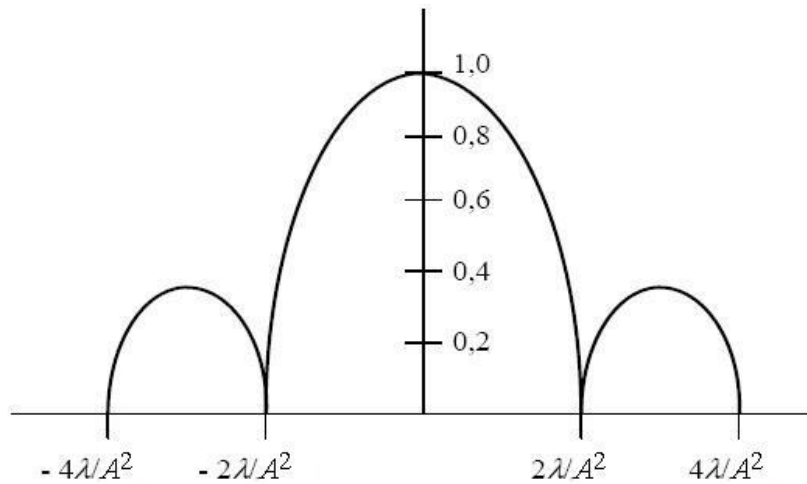


Рис. 1. Розподіл освітленості вздовж оптичної осі безабераційного об'єктива за умови зображення об'єктивом світлової точки.

Існують різновиди схем фотоелектричних установок, які відрізняються за тест-об'єктами та способами визначення площини зображення. У цій лабораторній роботі ми розглянемо схему з так званим *растровим модулятором*. Ця схема цікава, оскільки на пристроях, виконаних згідно з нею, можна не тільки визначати площину зображення, але й досліджувати інші оптичні характеристики, наприклад діаметр плями розсіяння, оптичну передаточну функцію та фокусну відстань. Звісно, можна було би скористатися сучаснішими модуляторами (наприклад, малогабаритними електрооптичними або акустооптичними), проте у виборі модулятора ми найперше керувалися міркуваннями простоти та вартості апаратури.

Принцип визначення площини зображення полягає у визначенні такого положення модульовального растра досліджуваного об'єктива, за якого модуляція світлового потоку, обмеженого круглою діафрагмою, максимальна. Загалом *глибину* (або *коефіцієнт*) *модуляції*  $M$  визначають як відношення найбільшого значення амплітуди модульованого сигналу  $Q_{\max}$  до величини сигналу  $Q_0$  до початку модуляції:

$$M = Q_{\max}/Q_0$$

(див. рис. 2). Під час модуляції потоку випромінювання, обмеженого круглою діафрагмою, за допомогою растра (радіальної міри) амплітуда сигналу досягне максимуму тоді, коли діаметр діафрагми дорівнюватиме відстані між секторами растра на певному фіксованому радіусі  $R$ .

Якщо діафрагма далі переміщується вздовж сектора растра від його центру до краю, то амплітуда сигналу практично незмінна, але змінюється форма сигналу. Тому для фіксування площини зображення досліджуваного фотооб'єктива за максимальним сигналом у схемі потрібно, щоби діаметр зображення діафрагми дорівнював відстані між секторами на середньому радіусі зони радіального растра, на який проєктують зображення діафрагми. Цей діаметр може бути й дещо більшим, проте не меншим, аніж згадана відстань. Середній радіус зони растра вибирають на підставі умов вимірювань і конструктивних міркувань.

Згідно з рис. 2, залежність між діаметром  $d'$  зображення діафрагми і радіусом растра  $R$ , що фіксує зображення, така:

$$d' = 2R \sin(\varphi/2), \quad (2)$$

де  $\varphi = \pi/m$ ,  $\varphi$  – кут сектора растра,  $m$  – кількість пар секторів (у цій лабораторній роботі маємо  $m = 40$ ).

Діаметр отвору діафрагми  $d$  становить

$$d = d' \frac{f'_{\kappa}}{f'_{об}} = 2R \sin\left(\frac{\varphi}{2} \frac{f'_{\kappa}}{f'_{об}}\right), \quad (3)$$

де  $f'_{об}$  – фокусна відстань досліджуваного фотооб'єктива,  $f'_{\kappa}$  – фокусна відстань об'єктива коліматора. Для практичного використання формулу (3) за умови  $\varphi < 10^\circ$  можна представити у вигляді

$$d \approx \frac{\pi R f'_{\kappa}}{m f'_{об}}. \quad (4)$$

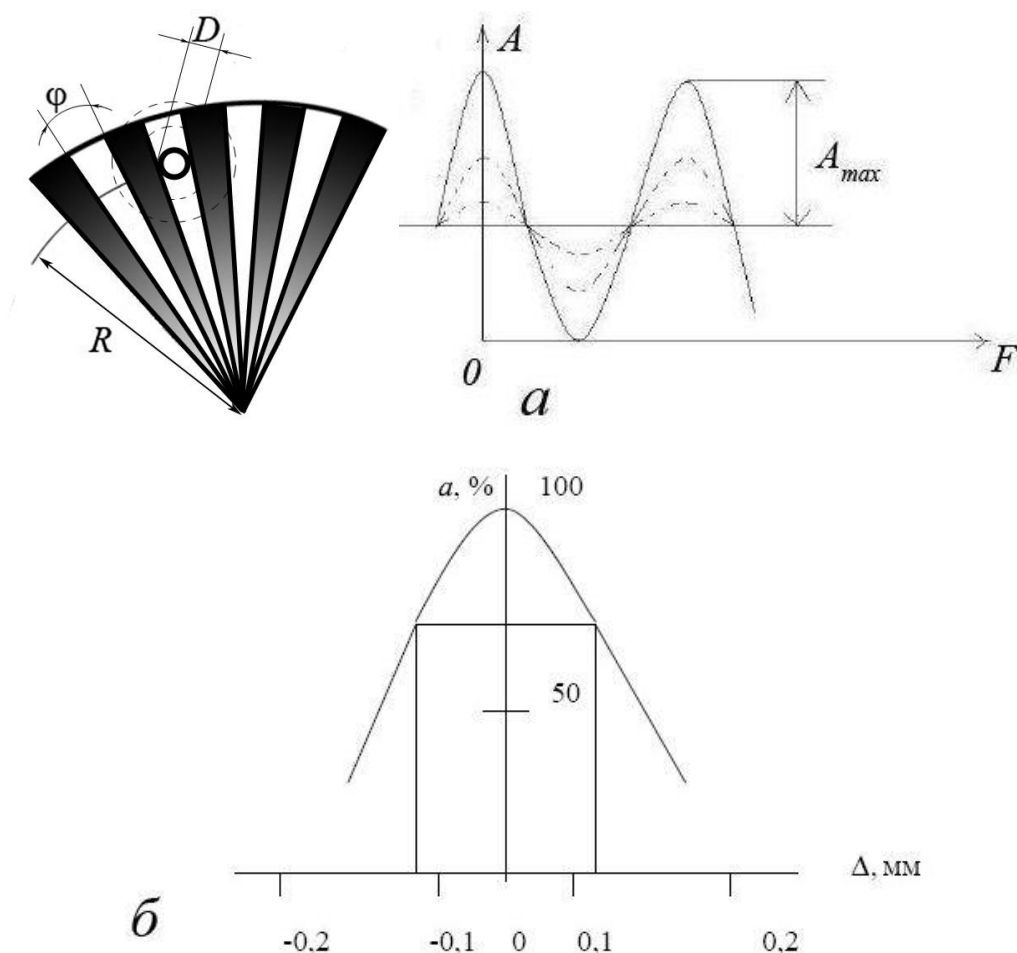


Рис. 2. Визначення площини зображення за допомогою секторного растра: а) принцип визначення площини зображення за максимальною глибиною модуляції; б) графік зміни сигналу за умови розфокусування.

Відповідність вимірної фокусної відстані розрахунковій величині характеризує правильність виготовлення деталей і якість складання об'єктива. Крім того, фокусна відстань оптичної системи, що визначає масштаб зображення, – це одна з її основних характеристик.

У вимірюваннях фокусної відстані спочатку виконують фокусування досліджуваного фотооб'єктива – визначають розташування площини найвищої різкості зображення. Це площина, у якій зосереджена максимальна світлова енергія за найменших розмірів зображення точкової діаграми. Розташування цієї площини найточніше знаходять саме за допомогою фотоелектричного методу, описаного вище.

### 3. Фотоелектричний пристрій для визначення фокусної відстані фотооб'єктивів

Для вимірювання фокусних відстаней на фотоелектричному пристрої використовують метод, заснований на визначенні збільшення оптичної системи. Схема пристрою (рис. 3) відрізняється від схеми візуального вимірювання фокусної відстані найперше вимірювальним устаткуванням. Розгляньмо принцип роботи схеми. Зображення круглої діафрагми 3 з діаметром  $d$ , рівномірно освітленої джерелом світла 1 за допомогою конденсора 2, проєктують коліматорним об'єктивом 4 і досліджуваним фотооб'єктивом 5 на площину модульовального растра 6. За ним розташований фотоприймач 7, підсилювач 8 і прилад реєстрування 9.

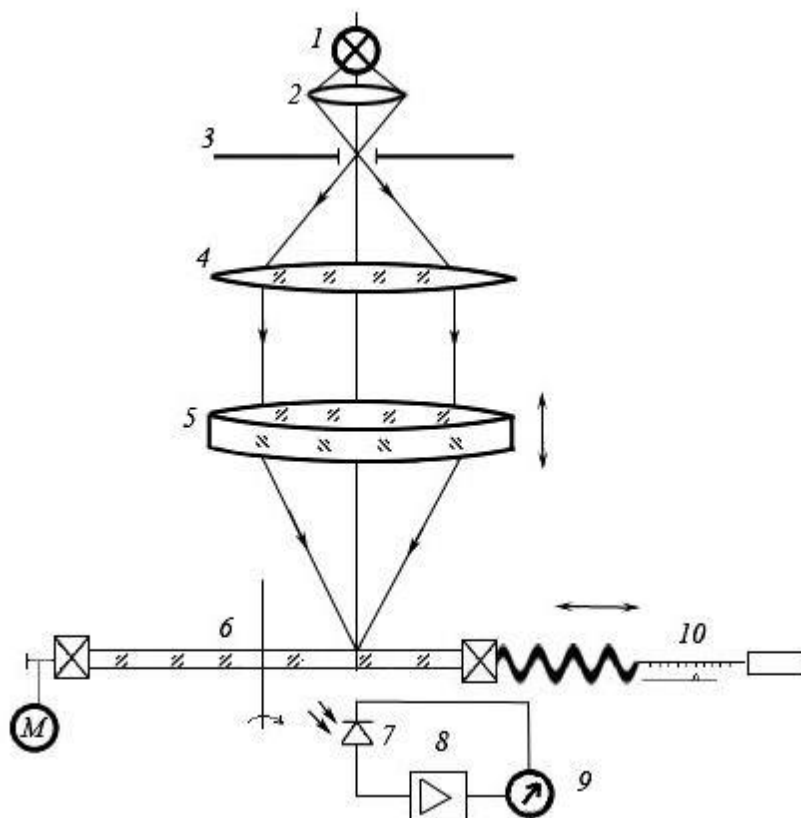


Рис. 3. Схема пристрою для вимірювання фокусної відстані фотооб'єктива за фотоелектричним методом: 1 – джерело світла; 2 – конденсор; 3 – діафрагма; 4 – коліматорний об'єктив; 5 – досліджуваний об'єктив; 6 – модульовальний растр; 7 – фотоприймач; 8 – підсилювач; 9 – прилад реєстрування; 10 – пристрій переміщення.

Згідно з формулою (3), фокусна відстань дорівнює  $f'_{об} = 2R \sin([\varphi'_k / (2d)]$  або

$$f'_{об} = \frac{f'_k d'}{d}. \quad (5)$$

Водночас, за формулою (4) маємо

$$f'_{об} \approx \frac{\pi R f'_k}{md}. \quad (6)$$

Вимірювальний пристрій складається з модульовального растра (радіальної міри) 6, фотоприймача 7 і приладу електричної реєстрування 9. Радіальна міра обертається навколо осі, паралельної до оптичної осі схеми, і переміщується в перпендикулярному до неї напрямку за допомогою пристрою 10.

Положення площини найвищої різкості зображення фіксуємо пристроєм вимірювання за максимальним сигналом на реєструвальному приладі. Зміну сигналу за умови розфокусування зображено на рис. 2б. Далі знаходять радіус  $R$  растра, що фіксує зображення діафрагми, діаметр якої дорівнює відстані між секторами растра.

Величину  $R$  можна виміряти, виділяючи основну частоту (т. зв. «першу гармоніку») одержаного сигналу  $f_0$ . Тоді потрібно застосовувати резонансний підсилювач, налаштований на частоту модуляції потоку випромінювання растром. Резонансний підсилювач найстабільніший у роботі. За допомогою нього можна відсікати завади, які мають частоти, вищі та нижчі за  $f_0$ , одержуючи задовільне відношення сигнал–шум, тобто стабільні результати вимірювань. Ця методика така. Амплітуда першої гармоніки  $a_1$  модульованого сигналу, який потрапляє на фотоприймач, з точністю до постійного множника дорівнює модулеві частотного спектра  $\tilde{E}(N_1)$  функції розподілу освітленості в зображенні діаграми на основній просторовій частоті модулятора  $N_1$ :

$$a_1 = 4|\tilde{E}(N_1)|. \quad (7)$$

Оскільки зображення діаграми має форму круга з рівномірною освітленістю по площі, то частотний спектр функції розподілу освітленості в зображенні діаграми має вигляд

$$\tilde{E}(N_1) = \frac{2J_1(z)}{z}, \quad (8)$$

де  $J_1(z)$  – це спеціальна функція (т. зв. функція Бесселя першого роду першого порядку, значення якої протабульовано в довідниках),  $z$  – позначення ( $z = \pi N_1 d$ ).

Підставляючи замість  $N_1$  його значення для радіальної міри  $N_1 = \frac{m}{\pi R}$  і використовуючи формулу (7), одержимо вираз для амплітуди  $a_1$  залежно від радіуса міри  $R$ :

$$a_1 = 16J_1\left(\frac{d'm}{2R}\right) \frac{R}{d'm}. \quad (9)$$

На рис. 4 графічно зображено залежність (9) для круглих діафрагм з різними діаметрами.

Визначмо значення радіуса растра, на якому діаметр зображення діафрагми вписується в сектор растра:

$$R = \frac{d'm}{\pi}. \quad (10)$$

Записуючи формулу (9) з урахуванням (10) і нормуючи її за умовою  $a_{\max} = 1$ , одержимо

$$a_1 = \frac{2J_1(\pi/2)}{\pi/2} = 0.72.$$

Звідси випливає, що під час модуляції світлового потоку на радіусі растра амплітуда першої гармоніки, яка визначається формулою (10), не залежить від діаметра діафрагми та має постійне значення 0,72.

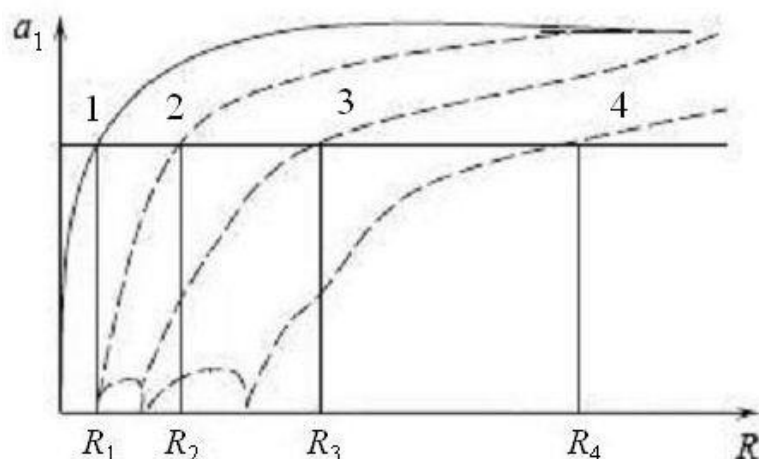


Рис. 4. Криві залежності амплітуди першої гармоніки  $a_1$  від радіуса растра  $R$  для діафрагм з різними діаметрами  $d$ : 1 –  $d = 0.1$  мм; 2 –  $d = 0.05$  мм; 3 –  $d = 0.03$  мм; 4 –  $d = 0.01$  мм.

Отже, радіус, на якому зображення діафрагми вписується в сектор растра, знаходять за амплітудою, яку реєструють вимірювальним приладом. Остання приблизно дорівнює 0.72 від максимального значення амплітуди, одержаної під час переміщення зображення діафрагми вздовж сектору растра. Далі за формулою (2) обчислюють  $d'$  і визначають  $f'_{об}$  за формулою (5). Шкалу 10 переміщення растра можна градувати безпосередньо в значеннях фокусних відстаней, згідно з формулою для схеми з прямим ходом променів:

$$f'_{об} = \frac{2f'_к R \sin(\varphi/2)}{d} = C_1 R,$$

де  $C_1 = 2f'_к \sin(\varphi/2)/d$  – це постійний коефіцієнт. Його можна обчислити за параметрами приладу, якщо вони виміряні з найвищою точністю.

Похибка вимірювання фокусної відстані найперше залежить від похибки вимірювання радіуса  $R$ , що фіксує зображення діафрагми. Проаналізуємо згадані похибки визначення розміру плями розсіяння за стандартною теорією похибок:

$$\Delta R = \Delta R_M + \Delta R_E, \quad (11)$$

де  $\Delta R_M$  – похибка механізму переміщення,  $\Delta R_E$  – порогова чутливість фотоелектричного пристрою.

На підставі даних  $\Delta R_M = 0.005$  мм і  $\Delta R_E = 0.002$  мм одержимо  $\Delta R = 0.007$  мм. Тоді за умови  $\varphi = 1^\circ$  матимемо  $\Delta d' = 0.0001$  мм. Відносна похибка визначення фокусної відстані становить

$$\frac{\Delta f'_{об}}{f'_{об}} = \frac{\Delta f'_к}{f'_к} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta d'}{d'}. \quad (12)$$

Нехай  $\frac{\Delta f'_k}{f'_k} = 0.05\%$  і  $\frac{\Delta d}{d} = 0.05\%$ . Тоді за умови  $\frac{\Delta d'}{d'} = \frac{0.0001}{0.1} = 0.1\%$  одержимо

практичну похибку вимірювання фокусної відстані, що складає 0.2%. Це відповідає виробничим допускам, заданим технічними вимогами на об'єктиви.

#### 4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Складіть схему для визначення фокусної відстані досліджуваного фотооб'єктива за фотоелектричним методом, зображену на рис. 3.
2. За допомогою спеціального механізму перемістіть растровий модулятор у напрямку, перпендикулярному до оптичної осі системи, приблизно на половину радіуса растра.
3. Увімкніть джерело випромінювання та вимірювальний пристрій у мережу.
4. За допомогою переміщень досліджуваного фотооб'єктива вздовж оптичної осі досягніть максимального сигналу на реєструвальному приладі. Так встановлюють розташування растрового модулятора в площині найвищої різкості зображення. Зафіксуйте це положення об'єктива.
5. Механічним переміщенням у напрямку, перпендикулярному до оптичної осі системи, поверніть растровий модулятор до його центру так, щоб зображення діафрагми потрапило на позначену мітку на модуляторі.
6. Увімкніть пристрій обертання растрового модулятора навколо осі, паралельної до оптичної осі системи, і поступово переміщуйте цей модулятор у напрямку від центра до краю, перпендикулярному до оптичної осі, з кроком 0,8 мм. Одночасно з цим переміщенням визначайте амплітуду першої гармоніки за допомогою вимірювального пристрою.
7. Побудуйте залежність  $a_1(R)$ . Для величини  $a_1$ , що дорівнює 0.72 від максимального значення зареєстрованої амплітуди, визначте радіус растра, на якому зображення діафрагми вписується в сектор растра. Для практичної зручності позначимо його як  $R_0$ .
8. На підставі одержаного експериментально значення  $R_0$  і відомих значень технічних параметрів установки ( $d = 2.5$  мм,  $f'_k = 160$  мм і  $m = 40$ ) обчисліть фокусну відстань фотооб'єктива  $f'_{об}$  за формулою (6):

$$f'_{об} \approx \frac{\pi R_0 f'_k}{md}. \quad (13)$$