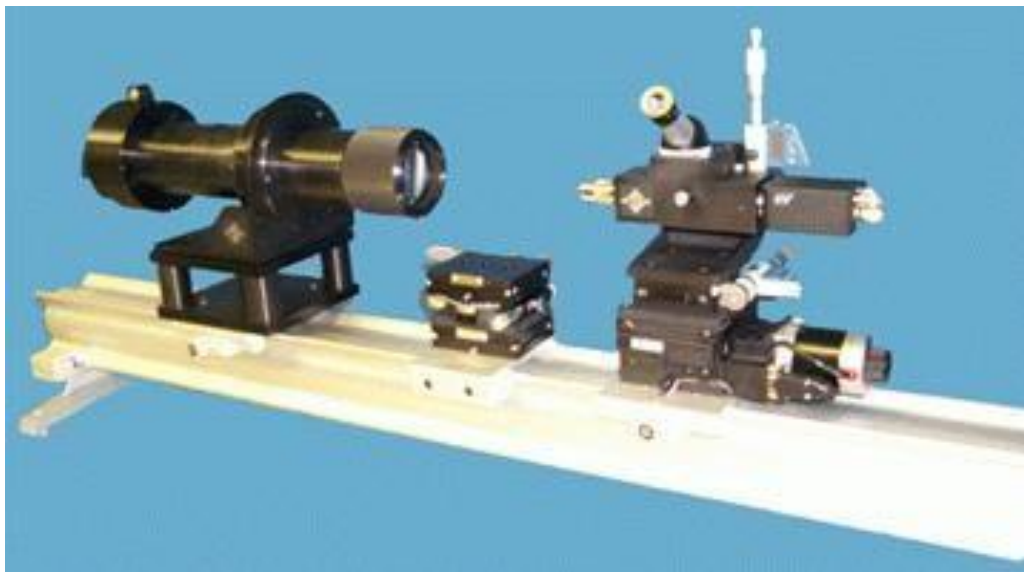


*О.К.Кучеренко*

*КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ*  
*ЗОБРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТИВІВ*



*КПІ ім. Ігоря Сікорського*

*Київ-2020*

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**О.К.Кучеренко**

**КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ  
ОБ'ЄКТИВІВ**

Монографія

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського

2020

УДК 681.785.6

К95

*Рекомендовано до видання Вченою радою «КПІ ім. Ігоря Сікорського»*

*(протокол № 4 від 10 березня 2020 р.)*

Рецензенти:

д-р техн. наук С.О. Воронов (КПІ ім. Ігоря Сікорського),

канд. техн. наук І.М. Русняк (НДІ «Квант»).

Відповідальний редактор:

канд. техн. наук В.І.Микитенко (КПІ ім. Ігоря Сікорського) .

**К95. Контроль** якості зображення об'єктивів : монографія Уклад. : О. К. Кучеренко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.– 85с.

**ISBN 5-217-00920-9**

Розглянуто характеристики і критерії якості зображення об'єктивів. Запропоновані схеми установок для вимірювання визначених характеристик. Більш детально розглянуті проблеми з якими можуть стикатися розробники установок для контролю якості об'єктивів та запропоновані шляхи їх вирішення. Значна увага приділена похибкам установок для оцінки якості зображення об'єктивів. Для наукових та інженерно-технічних працівників, студентів спеціальності: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології» освітньо-професійної програми « Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології»

УДК 681.785.6

ISBN 5-217-00920-9 © О.К. Кучеренко, 2020

Н а у к о в е в и д а н н я

Кучеренко Олег Костянтинович

# **КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТИВІВ**

## **Монографія**

*В авторській редакції*

Підп. до друку..... Формат 60x84

## ЗМІСТ

<i>ВСТУП</i> .....	7
<i>РОЗДІЛ 1</i> .....	9
<i>КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТИВІВ</i> .....	9
1.1. Характеристики якості зображення об'єктивів .....	9
1.1.1. Функція розсіювання .....	11
1.1.2. Функція концентрації енергії в колі розсіювання .....	13
1.1.3. Гранична крива .....	14
1.1.4. Оптична передавальна функція .....	16
1.2. Числові критерії оцінки якості зображення об'єктивів .....	21
1.2.1. Числові критерії визначені на основі функцій розсіювання точки, лінії і граничної кривої .....	21
1.2.2. Числові критерії визначені на основі оптичної передавальної функції .....	25
<i>РОЗДІЛ 2</i> .....	29
<i>МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТИВІВ</i> .....	29
2.1. Установки з механічним скануванням в площині зображення .....	29
2.1.1. Установки з періодичним тест-об'єктом .....	29
2.1.2. Установки з неперіодичним тест-об'єктом .....	33
2.2. Установки з використанням лінійного приймача з переносом заряду .....	36
2.2.1. Принцип дії установки .....	36
2.2.2. Визначення параметрів вузла фотометрування .....	39
2.3. Установки контролю якості зображення об'єктивів з використанням мікроболометричних матриць .....	44
2.3.1. Установки з використанням мікрооб'єктива .....	44
2.3.2. Установки з поворотом зображення тест-об'єкта і мікроскануванням .....	48
<i>РОЗДІЛ 3</i> .....	60
<i>ФАКТОРИ ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ</i> .....	60

3.1. Вимоги до освітлювальної системи установки .....	61
3.1.1. Вимоги до джерела і коліматорного об'єктива .....	61
3.1.2. Вимоги до тест-об'єкта .....	67
3.2. Вимоги до фотоприймального вузла установки .....	72
3.2.1. Корекція неоднорідності чутливості.....	72
3.2.2. Вимоги до точності позиціювання фотоприймального вузла ....	75
<i>ВИСНОВКИ</i> .....	79
Перелік посилань.....	82

## ВСТУП

Електромагнітне випромінювання оптичного діапазону знаходить все більш широке використання в різних галузях науки і техніки. Оптична система, а саме об'єктив, що фокусує, є основною складовою приладів, що використовують цей спектральний діапазон. Останнім часом об'єднуючим терміном напрямків досліджування і використання приладів оптичного діапазону став термін фотоніка. Американська Програма розвитку фотоніки зробила прогноз, що ринок фотоніки в США буде подвоюватися кожні чотири роки і досягне в 2013 році 500 мільярдів доларів. Далі він буде подвоюватися вже кожні два роки. До 2015 року ринок фотоніки досяг 1 трлн доларів. За аналізом Програми в 2015 році більше 35% всіх випущених споживчих товарів становлять прилади та пристрої створені на основі принципів фотоніки.

У зв'язку з бурхливим розвитком фотоприймальних пристроїв, що перетворюють оптичний сигнал в електричний, підвищуються вимоги до якості зображення, яке будується об'єктивом в чутливій площині цього пристрою. Сучасні матричні приймачі мають роздільну здатність до  $100\text{мм}^{-1}$ . Відповідно об'єктив повинен мати роздільну здатність, яка б відповідала цим вимогам і створювала зображення необхідного контрасту. Існуючі програми розрахунку дозволяють визначити конструктивні параметри такого об'єктива. Однак, в наслідок неминучих похибок виготовлення об'єктива, реальна якість зображення відрізняється від розрахункової. Крім того часто виникає потреба в ході складання об'єктива контролювати якість зображення, щоб в ході юстування отримати якість зображення наближену до теоретичної межі. Відповідно виникає потреба

визначити характеристики, за допомогою яких можна оцінити якість зображення з просторової і енергетичної точок зору.

Останнім часом основна увага конструкторів і дослідників приділяється розробці установок для оцінки якості об'єктивів по їх оптичній передавальній функції. Згідно до вимог міжнародної системи по стандартизації ISO (International Organization for Standardization) стандартом ISO 12233 оптична передавальна функція і її складові модуляційна передавальна функція і фазова передавальна функція визначені як основні характеристики для оцінки якості зображення об'єктивів. Дослідники і конструктори постійно приділяють значну увагу вдосконаленню методів контролю якості зображення. Особливо ця задача є актуальною внаслідок розширення номенклатури об'єктивів, що працюють в різних спектральних діапазонах, складних умовах експлуатації, стрімкого розвитку нових напрямків в оптиці, наприклад волоконної і інтегральної оптики. Установки для контролю якості зображення об'єктивів весь час вдосконалюються, в зв'язку з появою сучасної елементної бази фотоприймачів для цифрової обробки зображення і перетворення його в електричний сигнал. Це насамперед приймачі з переносом заряду і матричні фотоприймачі. Актуальною постає задача узгодження роздільної здатності цих приймачів з очікуваною роздільною здатністю об'єктивів, що контролюються. Важливим питанням є також аналіз факторів, які впливають на точність вимірювання оптичної передавальної функції. Автор монографії на протязі декількох років займається цією проблемою і запропонував методи підвищення ефективності контролю якості зображення об'єктивів і визначення параметрів елементної бази установок [1,2,3]. Розгляду цих питань з викладенням матеріалів дослідження автора присвячена дана монографія.



# РОЗДІЛ 1

## КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТИВІВ

### 1.1. Характеристики якості зображення об'єктивів

Реальна оптична система створює зображення предмета з певним спотворенням. Відмінність зображення від предмета виникає внаслідок аберацій оптичної системи, дифракційних явищ, дефектів виготовлення і складання, а також інших факторів [4].

Якість зображення залежить від аберацій різних видів. Оптичні системи з великими абераціями характеризують, як правило, геометричними абераціями, а для систем з малими абераціями виявляється більш зручним використання хвильових аберацій [5, 6].

Геометричною аберацією називається відхилення значень координат променів реальної системи, від значення координат тих же променів, розрахованих для ідеальної системи. Геометричні аберації ділять на монохроматичні, які виникають при проходженні через систему променів світла однієї довжини хвилі, і хроматичні, що виникають при проходженні через систему променів з різними довжинами хвиль (біле світло)

До монохроматичних аберацій відносяться сферична (подовжня, поперечна), кома, астигматизм, кривизна поля, дісторсія, а до хроматичних – хроматизм положення і хроматизм збільшення [5].

Хвильовою аберацією оптичної системи називається відхилення реального хвильового фронту від поверхні порівняння: сфери для фотографічних об'єктивів, об'єктивів телескопів і інших об'єктивів; площини для телескопічних систем.

Хвильова аберація вимірюється в одиницях довжини хвилі. Якщо хвильова аберація менша або дорівнює  $0,1\lambda$ , то зображення точки вважають ідеальним. Якщо хвильова аберація дорівнює  $0,25\lambda$ , то зображення вважають хорошим. Вказані границі були знайдені англійським фізиком Релеєм і отримали назву «критерії Релея».

Аберації вимірюють в реальних оптичних системах для знаходження відповідності їх розрахунковим даним і для встановлення впливу кожної аберації на якість зображення. В залежності від призначення оптичної системи аберації вимірюють в кутовій мірі (для зорових труб и прожекторних дзеркал) або в лінійній мірі (в фотографічній оптиці). Хвильові аберації вимірюють в астрономічній і мікроскопічній оптиці, для спектральних призм і т.п.

Аберації разом з неминучими похибками виготовлення оптичних деталей і збірки елементів складних об'єктивів знижують якість зображення [6].

Характеристики якості зображення залежать від вимог, що пред'являються до оптичних систем. Об'єктиви астрономічних приладів, телескопічних систем, розраховуються з мінімальними абераціями, і основним обмеженням таких систем є дифракція на вхідній зіниці. Для оцінки якості зображення в таких системах, може бути використана функція розсіювання. Якість зображення оптичних систем, що мають велике кутове поле зору, працюючих з оком, матричним приймачем, телевізійною камерою, краще характеризувати контрастом, різкістю, мірою геометричної подібності. Критерієм якості зображення в цих системах може бути гранична крива. Оптичні системи оптико-електронних приладів, що працюють з одноелементним приймачем, які призначені для передачі світлової енергії на чутливу ділянку приймача променистої енергії, краще характеризувати функцією концентрації енергії.

На основі цього, критерії оцінки якості оптичного зображення для різних систем обирають в залежності від виконуваних задач. Характеристиками якості оптичного зображення, що відповідають перерахованим використанням є: функція розсіювання (ФР), гранична крива, функція концентрації енергії (ФКЕ), оптична передавальна функція (ОПФ). Ці критерії взаємопов'язані і взаємозамінні, проте, не однаково зручні для різних оптичних систем [6].

Всі характеристики можна отримати із математичного рівняння процесу утворення оптичною системою зображення, що показує залежність між розподілом освітленості в зображенні і розподілом яскравості в предметі [7,8,9]. Розглянемо ці характеристики більш детально.

### 1.1.1. Функція розсіювання

Функція розсіювання  $A(x', y')$  – це розподіл освітленості в зображенні нескінченно віддаленої світної точки, в площині найкращого зображення, що представляє собою дифракційну картину. Математичний вираз функції розсіювання  $A(x', y')$  для без абераційного об'єктива має вигляд [8]:

$$A(x', y') = \left[ \frac{2j_1(z_1)}{z_1} \right]^2,$$

де  $j_1(z_1)$  – функція Бесселя першого роду першого порядку.

Аргумент  $z_1$  дорівнює:

$$z_1 = \frac{\pi D}{\lambda f' \sigma},$$

де  $D$  – діаметр вхідної зіниці об'єктива;  $f'$  – фокусна відстань об'єктива;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $\sigma = \sqrt{(x')^2 + (y')^2}$  – відстань від центра плями розсіювання;  $x'$  і  $y'$  – координати в площині зображення.

Для реальних оптичних систем ця функція розсіювання найчастіше апроксимується гаусоїдою обертання згідно співвідношення [8]:

$$A(\rho') = e^{\frac{-(\rho')^2}{2(\rho'_0)^2}},$$

де  $\rho'$  – полярна координата точки в площині зображення;  $\rho'_0$  – апроксимуюче значення полярної координати, при якому освітленість складає 0,606 від максимального значення.

В центральному колі ФР міститься приблизно 84% світлової потужності всього кола розсіювання. Це коло приймають за зображення точки. Периферійні кільця містять відповідно 16% світлової потужності і являють собою фон зображення [8].

В реальних оптичних системах при наявності залишкових аберацій відбувається перерозподіл світлової енергії між центральним колом і світлими кільцями. Особливо складною дифракційна картина є в зображенні позавісьової точки поля. Саме тому за критерій оцінки якості зображення оптичних систем з невеликим полем зору і для досліджень по центру поля застосовують ФР. Радіус першого темного кільця має назву кола Ері, який дорівнює:

$$\rho_e = \frac{1,22 \cdot \lambda f}{D}.$$

Методом графічної інтерполяції (наближення) можна знайти співвідношення між радіусом кола Ері  $\rho_e$  і апроксимуючим радіусом  $\rho'_0$  [8]:

$$\rho_0 = 0,36\rho_e. \quad (1.1)$$

ФР, що характеризує розподіл енергії в зображенні світної точки носить назву функції розсіювання точки (ФРТ). Поняття ФР поширюють і на розподіл освітленості в зображенні світної лінії, що розташована в

нескінченності в площині предметів. В цьому випадку ФР носить назву функції розсіювання лінії (ФРЛ). ФРЛ є результат інтегрування ФРТ по одному з напрямів, наприклад,  $y'$ :

$$A_l(x') = \int_{-\infty}^{\infty} A(x', y') dy' .$$

Вигляд функцій розсіювання точки і лінії показаний на рис. 1.1 і рис. 1.2.

По вигляду функції розсіювання визначають наявність аберацій і дефектів виготовлення і складання об'єктивів.

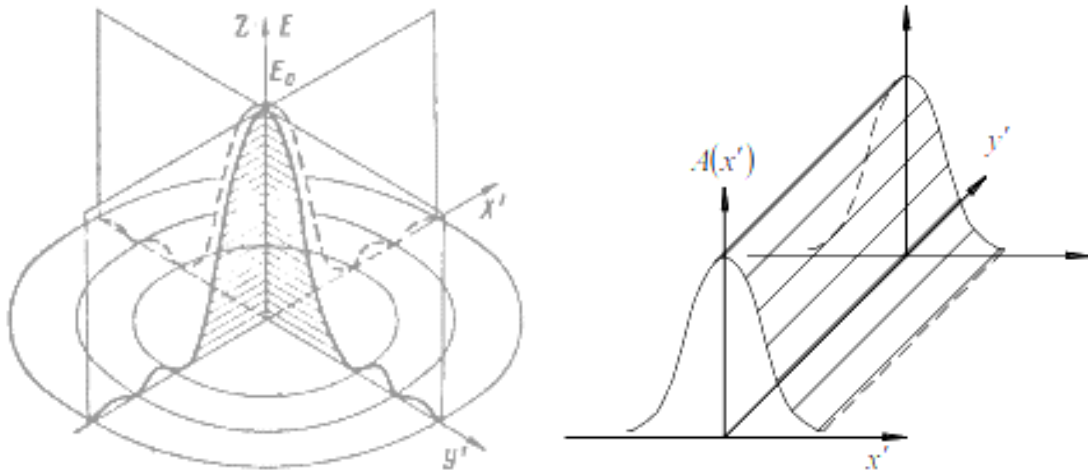


Рис. 1.1. Функція розсіювання точки    Рис. 1.2. Функція розсіювання лінії

### 1.1.2. Функція концентрації енергії в колі розсіювання

Функція концентрації енергії (ФКЕ) переважно використовується для контролю об'єктивів що фокусують зображення на одноелементний приймач випромінювання. В цьому випадку питання полягає в тому, щоб сконцентрувати випромінювання в межах чутливої площини фотоприймача. ФКЕ характеризує відношення кількості енергії усередині кола з радіусом  $\rho$  до усієї енергії в колі розсіювання :

$$\eta(\rho') = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho'} A(\rho', \varphi) \cdot \rho' \varphi \cdot d\rho' d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} A(\rho', \varphi) \cdot \rho' \varphi \cdot d\rho' d\varphi} .$$

Чим більше значення  $\eta(\rho')$ , тим краща оптична система.

Аналітичне значення для  $\eta(\rho')$  відомо тільки для безабераційної системи з круглою зіницею:

$$\eta(\rho') = 1 - I_0(z_0) - I_1^2(z_1),$$

де  $I_0, I_1$  – функції Бесселя нульового і першого порядку;  $z_0, z_1$  – параметри функцій, в які входять значення  $\rho'$ .

### 1.1.3. Гранична крива

Гранична крива – це розподіл освітленості в зображенні пограничного тесту. Пограничний тест є межею світлого і темного полів. Функція яскравості такого тесту є функцією стрибка. Вигляд розподілу яскравості для пограничного тесту і розподілу освітленості в зображенні цього тесту показаний на рис. 1.3.

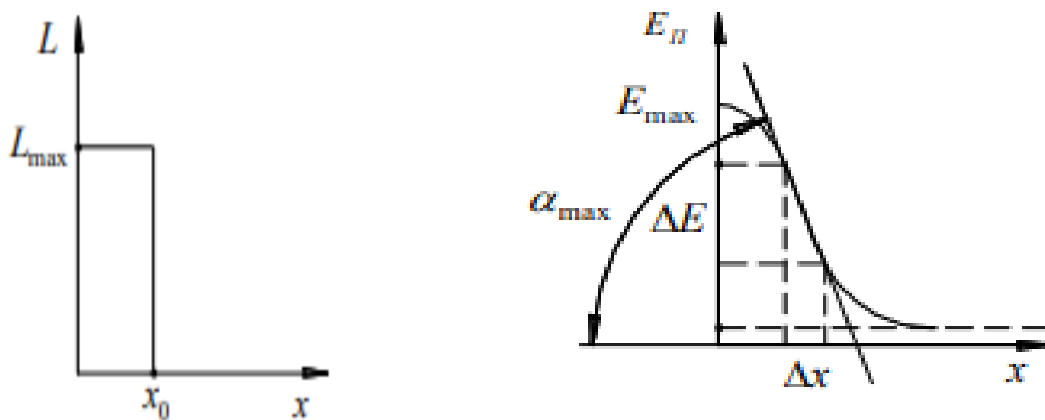


Рис.1.3. Розподіл яскравості і освітленості пограничного тесту

Аналітично розподіл яскравості в пограничному тесті для контрасту що дорівнює одиниці описується співвідношенням [8]:

$$L_{\Pi}(x) = \begin{cases} L_{max} & x \leq x_0 \\ L_{min} & x > x_0 \end{cases} .$$

Математично гранична крива може бути отримана як результат інтегрування ФРЛ по одній з координат:

$$E_{\Pi}(x') = \int_0^{\infty} A_l(x' - x_1') dx_1' .$$

Зв'язок між граничною кривою і ФРЛ такий:

$$A_l(x') = \frac{dE_{\Pi}(x')}{dx'} .$$

Графік граничної кривої наглядно демонструє зниження різкості зображення, що є одним із основних параметрів якості візуального зображення. Нахил кривої залежить від розміру кола розсіювання. Чим менший нахил кривої, тим більший розмір кола розсіювання і тим гірша різкість зображення. Звідси випливає, що кут нахилу граничної кривої характеризує якість зображення по різкості. Граничну криву як характеристику якості зображення використовують для систем, що створюють візуальне зображення з великим полем. Крім того, її можна застосувати для безпосередньої оцінки якості зображення складних систем, що складаються з об'єктива і різноманітних приймачів. Наприклад, кінофотоприлади можна перевірити за допомогою фотографічної граничної кривої, тобто отримати залежність густини почорніння світлочутливого шару від координат в площині фотоплівки.

Гранична крива в порівнянні з ФР більш зручна для оцінки якості зображення при випробуванні об'єктивів з великим полем зору, проте менш зручна для оцінки якості зображення при розрахунках.

### 1.1.4. Оптична передавальна функція

Оптична передавальна функція (ОПФ) найбільш універсальна характеристика, яка повністю характеризує якість зображення об'єктива. Вона показує як оптична система відтворює різні просторові частоти. Міжнародна система по стандартизації (ISO 12233) прийняла ОПФ як основну для оцінки якості зображення об'єктива.

Формально ОПФ може бути отримана з рівняння процесу утворення зображення, записаного в частотній формі. Це рівняння встановлює залежність між розподілом освітленості в площині зображення, якістю оптичної системи і розподілом яскравості в площині предмета. Виглядає це рівняння так [8]:

$$E(x', y') = \pi\tau \cdot \sin^2 U \iint_{-\infty}^{\infty} A(x' - x'_1, y' - y'_1) \cdot L\left(\frac{x'_1}{\beta}, \frac{y'_1}{\beta}\right) dx'_1 dy'_1, \quad (1.2)$$

де  $E(x', y')$  – функція, що характеризує розподіл освітленості в площині зображення поблизу точки з координатами  $x', y'$ ;  $\tau$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи;  $U$  – апертурний кут оптичної системи в площині зображення;  $A(x' - x'_1)(y' - y'_1)$  – функція розсіювання точки оптичної системи;  $x'_1, y'_1$  – змінні координати поблизу точки з координатами  $x', y'$ ;  $L\left(\frac{x'_1}{\beta}, \frac{y'_1}{\beta}\right)$  – функція, що характеризує яскравість в площині предмета в точці з координатами  $\frac{x'_1}{\beta}$  і  $\frac{y'_1}{\beta}$ ;  $\beta$  – збільшення оптичної системи.

Принцип взаємного розташування координат для довільної точки  $A$  ілюструє рис.1.4.



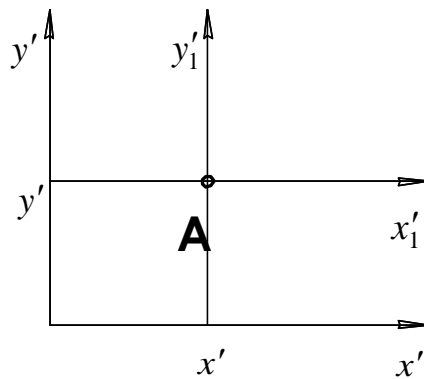


Рис. 1.4. Принцип взаємного розташування координат

Інтеграл (1.2) справедливий для лінійних і інваріантних (ізопланарних) оптичних систем. Система вважається лінійною, якщо її реакція на одночасну дію декількох сигналів дорівнює сумі реакцій на кожен сигнал окремо. Система вважається інваріантною, якщо імпульсний відгук системи залежить тільки від відстані між точками і не залежить від положення початку системи координат. Система ізопланарна або інваріантна, якщо її коло розсіювання однакове по усьому полю зображення.

Для реальних оптичних систем ця вимога не виконується. Тому поле зображення ділять на зони, в межах яких систему можна вважати ізопланарною. В межах кожної зони коло розсіювання однакове. Таких зон прийнято дві:

- по центру поля зору;
- по краю поля зору.

Інтеграл (1.2) є згортком функцій  $A$  і  $L$ . Виконавши перетворення Фур'є, можна перейти від лінійних координат до просторових частот і отримати вираз (1.2) в частотному виді:

$$\tilde{E}(v'_x, v'_y) = \tilde{A}(v'_x, v'_y) \times \tilde{L}\left(\frac{v'_x}{\beta}, \frac{v'_y}{\beta}\right),$$

де  $\tilde{E}(v'_x, v'_y)$ ,  $\tilde{A}(v'_x, v'_y)$  і  $\tilde{L}\left(\frac{v'_x}{\beta}, \frac{v'_y}{\beta}\right)$  – перетворення Фур'є відповідних функцій;  $v'_x, v'_y$  – просторові частоти, що дорівнюють зворотньому значенню періоду синусоїдальної зміни освітленості в просторі зображення по двох координатах.

Математично ОПФ є результатом Фур'є-перетворення ФР. Наприклад, Фур'є перетворення ФР для двовимірного об'єкту (точка, що світиться) таке:

$$\tilde{A}(v'_x, v'_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(x', y') \cdot e^{-j2\pi(v'_x \cdot x' + v'_y \cdot y')} dx' dy' .$$

Для подальших перетворень можна скористатися формулою Ейлера, розклавши експоненту на косінус і синус складові:

$$e^{-j\omega x} = \cos(\omega \cdot x) - j \sin(\omega \cdot x) \quad (1.3)$$

З урахуванням рівняння (1.3) для одновимірного об'єкту (тест-об'єкт лінія, що світиться), перетворення Фур'є ФР виглядатиме таким чином:

$$\tilde{A}(v') = \int_{-\infty}^{\infty} A(x') \cos(2\pi \cdot v' \cdot x') dx' - j \int_{-\infty}^{\infty} A(x') \sin(2\pi \cdot v' \cdot x') dx' \quad (1.4)$$

У співвідношенні (1.4) існують дійсна і уявна частини, що є відповідно косінус і синус Фур'є-перетвореннями :

$$T_c(v') = \int_{-\infty}^{\infty} A(x') \cos(2\pi \cdot v' \cdot x') dx'$$

– дійсна частина;

$$T_s(v') = -j \int_{-\infty}^{\infty} A(x') \sin(2\pi \cdot v' \cdot x') dx'$$

– уявна частина.

З урахуванням цього визначити ОПФ можна на основі співвідношення:

$$\tilde{A}(v') = T_c(v') - T_s(v') \quad .$$

ОПФ можна представити у вигляді модуля і аргументу. Модуль ОПФ дорівнює:

$$|\tilde{A}(v')| = T(v') = \sqrt{T_c(v')^2 + T_s(v')^2} \quad .$$

Модуль ОПФ  $T(v')$  має назву модуляційної передавальної функції (МПФ).

Аргумент ОПФ  $\varphi(v')$  має назву фазової передавальної функції (ФПФ), яка визначається із співвідношення:

$$\varphi(v') = \operatorname{arctg} \frac{T_s(v')}{T_c(v')} .$$

Фізично модуль ОПФ показує, з яким контрастом об'єktiv відтворює різні просторові частоти. Його інколи називають частотно-контрастною характеристикою, яка може бути визначена із співвідношення:

$$T(v') = \frac{k_1}{k_2} ,$$

де  $k_1$  – контраст в площині зображення на просторовій частоті  $v'$ ,  $k_2$  – контраст яскравості в площині предметів на тій самій просторовій частоті з урахуванням збільшення об'єктива.

Контраст  $k_1$  дорівнює:

$$k_1 = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} ,$$

де  $E_{\max}$  і  $E_{\min}$  – максимальна і мінімальна опроміненості в площині зображення.

Контраст  $k_2$  дорівнює:

$$k_2 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}},$$

де  $L_{\max}$  і  $L_{\min}$  – максимальна і мінімальна яскравості в площині предметів.

Для двовимірного об'єкта з урахуванням наведених вище співвідношень ОПФ може бути записана в наступному вигляді:

$$\tilde{A}(v'_x, v'_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(x', y') \cdot e^{-j2\pi(v'_x \cdot x' + v'_y \cdot y')} dx' dy'$$

Типовий вигляд нормованих характеристик МПФ і ФПФ показаний на рис.1.5.

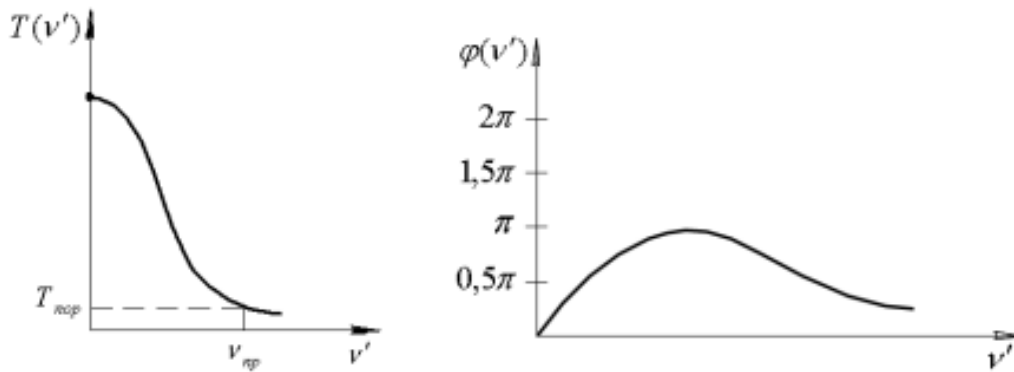


Рис.1.5. Типовий вигляд нормованих характеристик МПФ і ФПФ

При  $v'=0$  МПФ має максимальне значення, що дорівнює 1. Значення ФПФ при  $v'=0$  дорівнює нулю. Максимальне значення зміни фази дорівнює  $2\pi$ . Наявність ФПФ визначається несиметричністю ФР об'єктива, що вказує на несиметричні залишкові аберації (наприклад кома). Якщо ж функція розсіювання симетрична, то не важко показати, використовуючи формулу (1.18), що ФПФ при цьому відсутня і ОПФ визначається тільки МПФ. Об'єктиви високої якості мають невеликі фазові зміни, тому, як правило, дослідження проводять тільки по МПФ, яка дає найбільш повну і об'єктивну інформацію про об'єктив [7].

Перевага ОПФ перед іншими характеристиками полягає в тому, що МПФ складної системи  $T_c(v'_x, v'_y)$  може бути отримана, як результат добутку МПФ окремих її елементів  $T_i(v'_x, v'_y)$ :

$$T_c(v'_x, v'_y) = \prod_{i=1} T_i(v'_x, v'_y).$$

## **1.2. Числові критерії оцінки якості зображення об'єктів**

Практика оцінок об'єктів в умовах їх серійного виробництва показує, що характеризувати якість зображення функціональною залежністю недостатньо зручно і надмірно трудомістко. Потрібно характеризувати якість зображення числами. Такі числа, називаються числовими критеріями якості зображення і отримують їх при аналізі обраної характеристики якості зображення, або безпосередньо з самого зображення обраного тест-об'єкта [6].

### **1.2.1. Числові критерії визначені на основі функцій розсіювання точки, лінії і граничної кривої**

Для виробничого контролю об'єктива по ФР використовують різні числові критерії:

- лінійна або кутова роздільна здатність;
- число Штреля;
- функція концентрації енергії в колі розсіювання.

Лінійна роздільна здатність по Релею один із перших критеріїв в історії. Він був розроблений з появою перших телескопів і мікроскопів. Лінійна роздільна здатність вимірюється як мінімальна відстань між двома

точками об'єкта, при якій їх видно окремо через оптичний прилад [5]. Цей критерій показує здатність приладу зображувати два близько розташованих точкові предмети і дорівнює мінімальній відстані між ними, при якій зображення двох точок відрізняється від зображення однієї точки.

В залежності від прийнятого правила, по якому встановлюється вказана відмінність, роздільна здатність по Релею може мати різні значення. Зазвичай вирішальне правило пов'язують з відносною величиною  $\varepsilon$  провалу в розподілі інтенсивності в зображенні двох точок (рис. 1.6). При  $\varepsilon = 0$  отримуємо абсолютний критерій розділення  $\sigma_0$  [7].

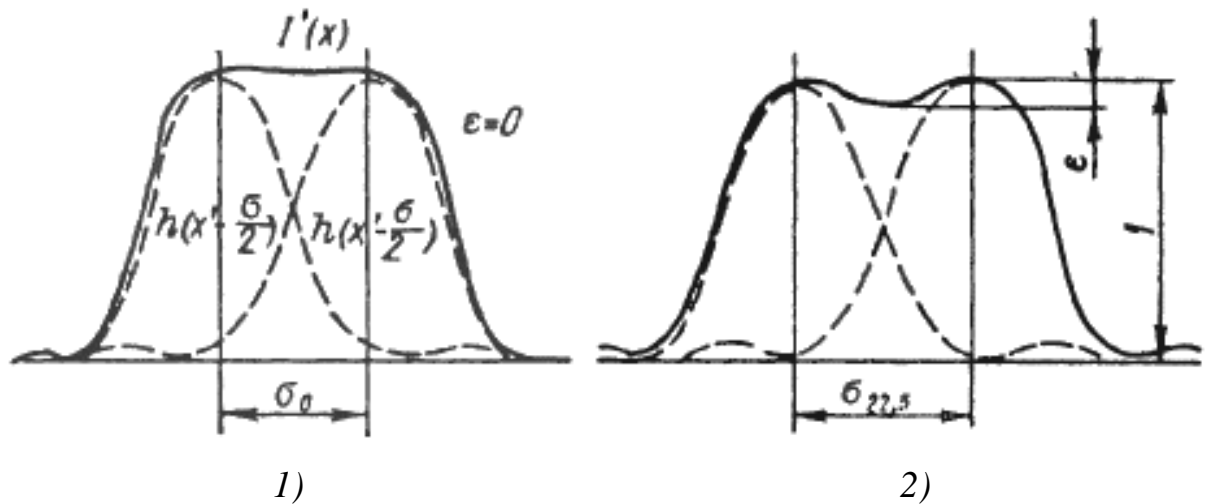


Рис. 1.6. Роздільна здатність по Релею:

1 – абсолютний критерій; 2 – критерій Релея

Визначимо лінійний роздільну здатність за допомогою ФРТ і ОПФ. Якщо  $I_1(y, z)$  та  $I_2(y, z)$  – розподіл освітленості в двох роздільних зображеннях світних точок, то при близькому розташуванні точок їх зображення частково накладаються один на одного і дають деяке сумарне розподілення освітленості. Позначивши відстань між точками в об'єкті як  $\varepsilon$ , визначимо контраст в зображенні пари точок [3]:

$$K = \frac{I(y=0) - I(y=\frac{\sigma}{2})}{I(y=0)} \geq K_{\text{п}} ,$$

де  $K_{\Pi}$  – пороговий контраст або ока або фотоприймача зображення.

Правило Релея потребує, щоб центральний максимум в зображенні однієї точки припадав би на перший мінімум в зображенні іншої, для безабераційних об'єктивів це відповідає значенню  $\varepsilon = 0,255$ , а отже  $\sigma_R = \sigma_{22,5}$ . Для об'єктивів роздільна здатність по Релею визначається абераціями, а також розмірами і формою зіниці. Для виключення останніх зручно виражати  $\sigma_R$  в канонічних координатах, при цьому для круглої зіниці при відсутності аберацій маємо:  $\sigma_0 = 0,5; \sigma_{22,5} = 0,61$  канонічних одиниць [5].

Цю відстань можна визначити за формулою [5]:

$$\sigma_0 = \frac{1,22\lambda f'}{D},$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі;  $f'$  і  $D$  – відповідно фокусна відстань і діаметр вхідної зіниці об'єктива.

Роздільна здатність по Релею задовільно характеризує якість зображення астрономічних телескопів, спектральних приладів, для яких предметами є близько розташовані точки або лінії. Роздільна здатність по Релею в кутових одиницях дорівнює:

$$\psi'' = \frac{\rho_e}{f'_{об}} 206265.$$

Для когерентних систем значення  $\rho_e$  виявляється дещо більшим, ніж для некогерентних систем і дорівнює [5]:

$$\rho_e^{ког} = \frac{1,5 \cdot \lambda \cdot f'}{D}.$$

Це пов'язано з тим, що сумарна освітленість приймача випромінювання при освітленні двома точковими джерелами, визначається співвідношенням:

$$I(\rho') = \sqrt{[E_1(\rho') + E_2(\rho')]^2}.$$

Недолік цього критерію полягає в тому, що характеристики оптичних систем визначаються спільно з характеристиками приймача випромінювання. Тому був використаний більш об'єктивний критерій, що оцінює тільки об'єктив і носить назву число Штреля, або визначальна яскравість.

Число Штреля – це відношення найбільших значень освітленості в центрі дифракційного кола реальної системи, для якої хвильова аберація не дорівнює нулю, і безабераційної системи. Тобто, це найбільше нормованне значення освітленості в дифракційній картині зображення від точкового джерела. Аналітично його можна записати так:

$$S = \frac{E(W \neq 0)}{E(W = 0)},$$

де  $E$  – параметр, що характеризує освітленість;  $W$  – параметр, що характеризує значення хвильової аберації.

Встановлено, що оптична система є високоякісною, якщо  $S \geq 0,8$ .

Для кількісної оцінки якості об'єктивів з використанням граничної кривої застосовують такі числові критерії:

– граничний градієнт  $G_{\max}$  це значення тангенса кута нахилу дотичної в середній точці граничної кривої до осі абсцис (див.рис.1.3). що дорівнює:

$$G_{\max} = \operatorname{tg}(\alpha_{\max}) = \frac{\Delta E}{\Delta x};$$

– критерій  $P$  враховує перепад максимальних і мінімальних значень освітленості в граничній кривій, що дорівнює:

$$P = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{G_{\max}}.$$

Чим більше значення  $\operatorname{tg}(\alpha_{\max})$ , тим кращим є об'єктив.



### 1.2.2. Числові критерії визначені на основі оптичної передавальної функції

Роздільна здатність по Фуко застосовується для оцінки якості зображення фото-, теле-, і кінооб'єктів, що передають об'єкти складної структури. Роздільна здатність знаходиться як максимальна просторова частота періодичного тест-об'єкту, що складається з чорних і білих штрихів (міри Фуко), в зображенні якого ще окремо видні штрихи. Роздільна здатність виражається в лініях на міліметр або кутових величинах, в залежності від типу предмету і зображення [5].

Роздільна здатність визначається параметрами МПФ об'єктива, кривою контрастної чутливості приймача зображення і контрастом об'єкта – міри. Зазвичай її визначають для міри одиничного (абсолютного) контрасту. Якщо приймачем є око, то мають на увазі візуальну роздільну здатність  $R_v$ , якщо фотографічна плівка – фотографічну роздільну здатність  $R_f$ . Зазвичай  $R_v > R_f$ . Якщо ж приймачем є гіпотетичний ідеальний приймач, який може розрізнити в зображенні дуже малий але відмінний від нуля контраст, то мають на увазі граничну роздільну здатність  $R_0$ , що залежить тільки від МПФ об'єктива.

На практиці для ідеального об'єктива, який немає аберацій і формує сферичний хвильовий фронт роздільна здатність  $R_0$  за методом Фуко дорівнює [5]:

$$R = \frac{1,64A'}{\lambda} ,$$

де  $A'$  – задня апертура досліджуваної системи.

Для оцінки реального значення  $R$  по частотним критеріям користуються МПФ. Графіки МПФ дозволяють здійснити аналіз створюваного об'єктивом зображення і наочно показують, з яким

контрастом передає об'єктив ту чи іншу просторову частоту. Критерієм оцінки якості системи по МПФ слугує точка перетину графіка МПФ і графіка контрастної чутливості приймача зображення. На рис. 1.7 представлена методика визначення роздільної здатності по Фуко, де:  $T(\nu')$  – МПФ об'єктива;  $k'_\phi(\nu')$  і  $k'_\nu(\nu')$  – функції контрастної чутливості ока і фотоматеріалу.

Недоліком цього критерію є мала коректність, тобто мала стійкість до дій невеликих змін факторів, що впливають, і не висока кореляція з істинною якістю зображення, що визначається по тій задачі, для якої будується зображення.

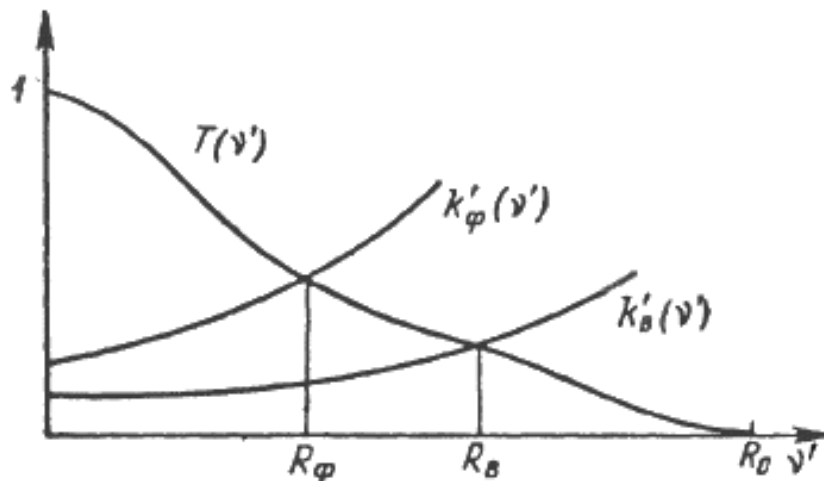


Рис. 1.7. Роздільна здатність по Фуко

Більш точним критерієм якості зображення по визначеній ОПФ є число Штреля  $S$ , яке дорівнює:

$$S = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(\nu'_x, \nu'_y) d\nu'_x d\nu'_y}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}_o(\nu'_x, \nu'_y) d\nu'_x d\nu'_y}$$

де  $\tilde{A}_o(v'_x, v'_y)$  – ОПФ безабераційної оптичної системи;  $\tilde{A}(v'_x, v'_y)$  – ОПФ реальної оптичної системи.

Для оптичних систем з симетричними аберациями, коли ФПФ дорівнює нулю, для  $S$  отримаємо:

$$S = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} T(v') dv'}{\int_{-\infty}^{\infty} T_o(v') dv'}$$

де  $T_o(v')$  і  $T(v')$  – значення МПФ для безабераційної і реальної систем.

Графічно величина  $S$  може бути визначена як відношення площин, що обмежені вісями координат та кривими МПФ для реальної і безабераційної систем.

При дослідженні об'єктива по МПФ для виділення того або іншого параметру використовують різноманітні графічні представлення залежності МПФ від просторової частоти в одному напрямку сканування. Якщо дослідження проводять в одній площині, то будують криві МПФ в координатах  $T$  і  $v'$  для різних відносних отворів, довжин хвиль, центра і края поля зору в меридіональному і сагітальному перетинах. МПФ показують в вигляді розфокусованих кривих, які дозволяють виявити площину найкращого зображення [6].

Деяким узагальненням числа Штреля можна вважати критерій Саянагі, що враховує МПФ приймача зображення  $|T_R(v')|$ . В цьому випадку  $S$  дорівнює [6]:

$$S = \frac{\iint |T(v')T_R(v')| dv'}{\iint T(v') dv'}$$

Останнім часом якість зображення об'єктива, який проектує зображення на багатоелементний приймач випромінювання прийнято

визначати на просторовій частоті Найквіста. Відповідно до теореми Котельнікова-Шеннона розділення матричного фотоприймача характеризується його частотою Найквіста [10]:

$$\nu = \frac{1}{2\Delta},$$

де  $\Delta$  – просторовий період слідування елементів матриці, що практично співпадає з їх розміром.

Частота Найквіста – це найвища частота сигналу, який може бути відновлений без спотворення після процесу дискретизації. Якщо зневажати залежністю чутливості фотоприймача від просторової координати точкового випромінювача в межах пікселя, а також, зневажати можливим перекриттям функцій чутливості сусідніх пікселів, будемо вважати чутливість пікселів прямокутною функцією. Фур'є-образом прямокутної функції шириною  $\Delta$  є функція

$$T(\nu) = \text{sinc}(\Delta\nu)$$

с першим нулем на частоті  $\nu = 1/\Delta$ .

В результаті на частоті Найквіста контраст дорівнює [10]:

$$T(\nu) = \text{sinc}(\Delta\nu) \approx 0,64.$$

Тобто для використання можливостей матричного фотоприймача об'єктив, що будує зображення в його площині, повинен створювати контраст, що відповідає критерію Найквіста. Числове значення цього контрасту може бути визначене з характеристики МПФ.

## **РОЗДІЛ 2**

### **МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ**

#### **ОБ'ЄКТИВІВ**

Для визначення характеристик якості зображення об'єктивів використовують установки побудовані на наступних принципах [11,12]:

- з механічним скануванням зображення одноелементним фотоприймачем;
- з використанням лінійного приймача з переносом заряду (ЛППЗ);
- з використанням матричних приймачів.

Розглянемо особливості і можливості вказаних установок з урахуванням їх переваг і недоліків.

#### **2.1. Установки з механічним скануванням в площині зображення**

Ці установки найбільш прості по конструкції, збираються на оптичній лаві і діють за принципом фотоелектричного фотометра. Такі установки використовують періодичний, або неперіодичний тест-об'єкт.

##### **2.1.1. Установки з періодичним тест-об'єктом**

Для вимірювання МПФ на кожній просторовій частоті достатньо вимірювати модуляцію в зображенні синусоїдальної міри на цій просторовій частоті і поділити на модуляцію потоку випромінювання в тій самій мірі [7].

В установках такого типа об'єктив що досліджується буде зображення тест-об'єкта простої форми, наприклад синусоїдальної міри, а

розташований в площині зображення аналізуючий елемент (вузька щілина з фотоприймачем) пересувається в поперечному напрямку послідовно вимірюючи максимальне і мінімальне значення опроміненості. Схема установки представлена на рис. 2.1.

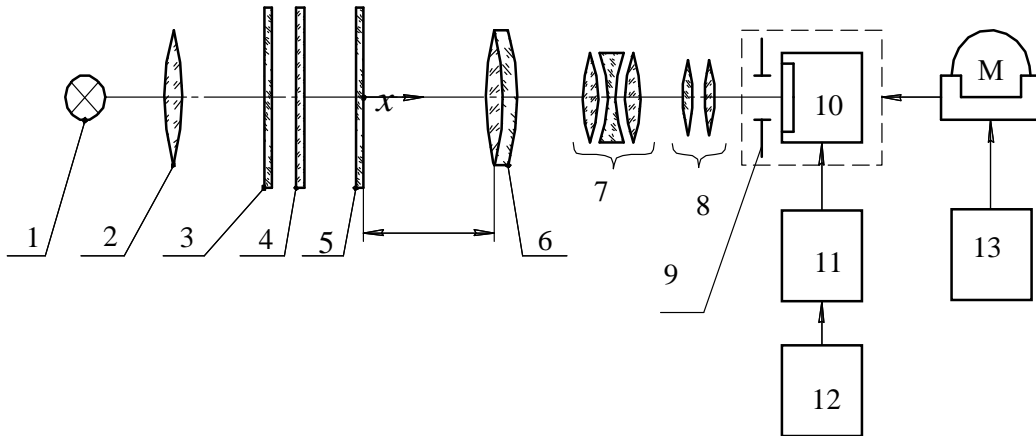


Рис. 2.1. Схема установки з гармонійним аналізом оптичного сигналу

Установка містить: 1 – джерело світла (лампа розжарювання); 2 – конденсор; 3 – світлофільтр, розрахований на спектральну область роботи випробовуваного об'єктиву; 4 – світлорозсіювач або молочне скло; 5 – тест-об'єкт; 6 – коліматорний об'єктив; 7 – випробовуваний об'єктив; 8 – проєкційний мікрооб'єктив; 9 – аналізуюча діафрагма; 10 – фотоприймач; 11 – підсилювач; 12 – блок реєстрації; 13 – кроковий двигун з блоком управління, що забезпечує переміщення.

Для того, щоб установка працювала за принципом гармонійного аналізу оптичного сигналу тест-об'єкт 5 повинен мати закон розподілу яскравості, що є гармонійною функцією. Враховуючи, що технологія створення таких тест-об'єктів складна, на практиці застосовують тест-об'єкти з прямокутним законом розподілу яскравості.( рис. 2.2.)

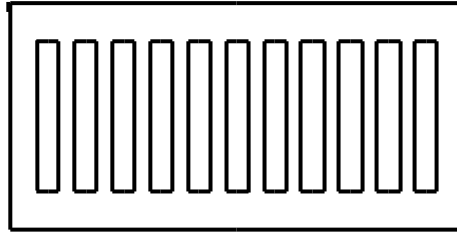


Рис. 2.2. Тест-об'єкт з прямокутним розподілом яскравості

Закон розподілу яскравості такого тест-об'єкта має вигляд якій показаний на рис. 2.3.

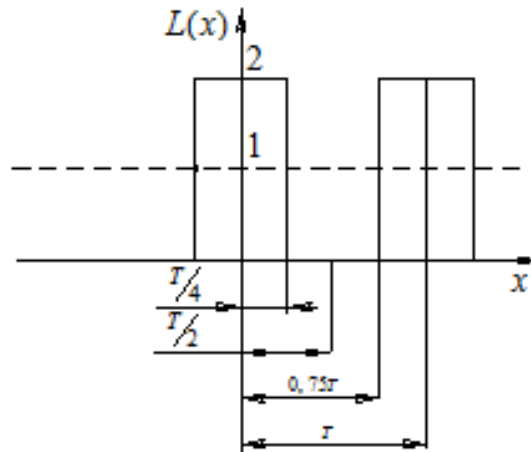


Рис. 2.3. Закон розподілу яскравості тест-об'єкта

Закон розподілу яскравості при використанні прямокутних мір в частотному вигляді представляється декількома гармонійними складовими:

$$L(x) = 1 + \frac{4}{\pi} \left( \cos(2\pi \cdot \nu \cdot x) - \frac{1}{3} \cos(2\pi \cdot 3\nu \cdot x) + \frac{1}{5} \cos(2\pi \cdot 5\nu \cdot x) - \dots \right).$$

У площині зображення в частотному вигляді закон розподілу освітленості в цьому випадку виглядає так:

$$E(x) = 1 + \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') \cos(2\pi \cdot \nu' \cdot x') - \frac{1}{3} T(3\nu') \cos(2\pi \cdot 3\nu' \cdot x') + \frac{1}{5} T(5\nu') \cos(2\pi \cdot 5\nu' \cdot x') - \dots \right) \quad (2.1)$$

При цьому вважається що ФПФ оптичної системи що досліджується дорівнює нулю. Тоді всі гармоніки мають максимальні амплітуди при  $x'=0$ , а мінімальні при  $x' = \frac{1}{2\nu'}$ . При цих значеннях  $x$  всі косінуси у формулі

(2.1) дорівнюють відповідно  $+1$  та  $-1$ , тоді отримаємо:

$$E(x'=0)_{\max} = 1 + \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') - \frac{1}{3} T(3\nu') + \frac{1}{5} T(5\nu') - \dots \right) \quad (2.2)$$

$$E\left(x' = \frac{1}{2\nu'}\right)_{\min} = 1 - \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') - \frac{1}{3} T(3\nu') + \frac{1}{5} T(5\nu') - \dots \right) \quad (2.3)$$

Коефіцієнт передачі контрасту на кожній просторовій частоті дорівнює:

$$T_{\Pi}(\nu') = \frac{E(x')_{\max} - E(x')_{\min}}{E(x')_{\max} + E(x')_{\min}} \quad (2.4)$$

Якщо зробити обчислення відповідно до виразу (2.4), то коефіцієнт передачі контрасту по прямокутній мірі визначиться із співвідношення:

$$T_{\Pi}(\nu') = \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') - \frac{1}{3} T(3\nu') + \frac{1}{5} T(5\nu') - \dots \right) \quad (2.5)$$

Використовуючи результати виміру ФПМ по прямокутних мірах з просторовими частотами  $T_{\Pi}(\nu')$ ,  $T_{\Pi}(3\nu')$ ,  $T_{\Pi}(5\nu')$  можна відповідно до формули Колтмена, за цими даними з врахуванням (2.5) порахувати ФПМ для синусоїдальної міри на просторовій частоті  $\nu'$  по формулі:

$$T_s(\nu') = \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') + \frac{1}{3} T(3\nu') - \frac{1}{5} T(5\nu') - \dots \right)$$

Недолік цього методу вимірів полягає в трудомісткості і неможливості отримувати результати в реальному масштабі часу.



### 2.1.2. Установки з неперіодичним тест-об'єктом

Такі установки також використовують сканування зображення, що будується оптичною системою, яка випробується. Принцип побудови такий самий як показано на рис. 2.1. Відмінністю є те, що в них замість періодичного тест-об'єкта використовується неперіодичний тест-об'єкт у вигляді точки, що світиться, або лінії. Результатом вимірювання є визначення характеристик ФРТ або ФРЛ з наступним виконанням Фур'є-перетворення для визначення МПФ. Розподіл яскравості тест-об'єкта у вигляді лінії, що світиться показано на рис. 2.4.

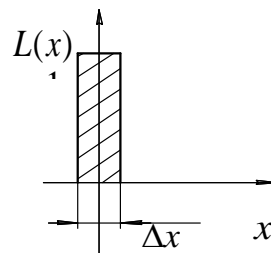


Рис. 2.4. Розподіл яскравості тест-об'єкта у вигляді лінії

При цьому вважається що  $\Delta x \rightarrow 0$ . Такий закон розподілу яскравості має назву одиничного імпульсу. Функція  $L(x)$  називається дельта-функцією і позначається  $\delta(x)$ . Вона дорівнює нулю в усіх випадках, крім випадків, коли точка  $x = x_0$ . При цьому площа імпульсу вважається кінцевою і дорівнює одиниці:

$$\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases}$$

Умова нормування має наступний вигляд:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$$

Спектр цієї функції з урахуванням перетворення Фур'є дорівнює:

$$\tilde{L}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-2\pi vx} dx$$

Враховуючи можливість розкладання  $e^{-j2\pi vx}$  з використанням формули Ейлера можна дійти висновку, що модуль ОПФ міститиме косинус-гармоніки, значення яких при  $x=0$  дорівнюють одиниці для усіх просторових частот  $\cos(2\pi \cdot v \cdot x)$ . Тобто спектр цієї функції містить усі гармоніки з амплітудою, рівною одиниці, а фазова характеристика такого сигналу дорівнює нулю для усіх просторових частот (рис. 2.5).

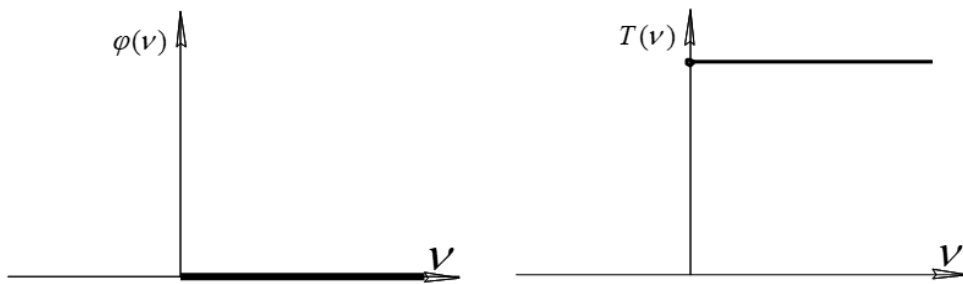


Рис. 2.5. Спектральні характеристики одиничного імпульсу

Фотографія установки з неперіодичним тест-об'єктом, яка призначена для випробування інфрачервоних дзеркальних об'єктівів представлена на рис. 2.6. В установці джерелом випромінювання є модель абсолютно чорного тіла (АЧТ), а в якості фотоприймача використовується піроприймач ПМ-4 з механічним модулятором. На рис. 2.7 представлена фотографія фотоприймального блоку установки. Механічне поперечне сканування здійснюється за допомогою мікрометричного гвинтового механізму.



Рис. 2.6. Установка з неперіодичним тест-об'єктом



Рис. 2.7. Фотоприймальний блок установки

Недолік методу полягає в необхідності розробки високоточного механічного привода для пересування фотоприймача і неможливості отримання результату в реальному масштабі часу. Це особливо важливо коли контроль якості зображення проводиться під час юстування об'єктива. З енергетичних міркувань виникає потреба збільшувати ширину щілини тест-об'єкта. А це призводить до появи додаткових похибок вимірювання МПФ об'єктива.

## 2.2. Установки з використанням лінійного приймача з переносом заряду

### 2.2.1. Принцип дії установки

Схема установки з неперіодичним тест-об'єктом, де в якості фотоприймача використовується ЛППЗ, представлена на рис. 2.8[13,14].

Установка містить наступні елементи: 1 – джерело випромінювання; 2 – конденсор; 3 – світлофільтр; 4 – молочне скло; 5 – вузол щілинної діафрагми; 6 – коліimatorний об'єктив; 7 – випробовуваний об'єктив; 8 – проєкційний мікрооб'єктив; 9 – фотоприймач ЛППЗ; 10 – АЦП; 11 – інтерфейс; 12 – комп'ютер.

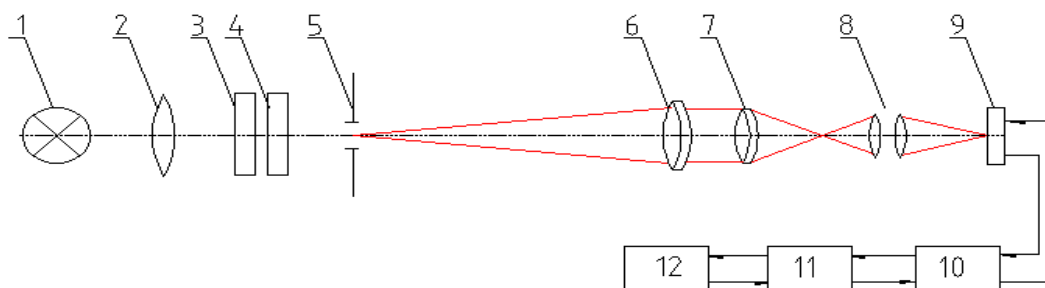


Рис.2.8. Установка з використанням ЛППЗ

Фотографія установки показана на рис. 2.9.



Рис.2.9. Установка з використанням ЛППЗ

Фотографія фотоприймального блоку показана на рис. 2.10. Як ЛППЗ була використана лінійка з розміром пікселя 9мкм.



Рис. 2.10. Фотоприймальний блок на базі ЛППЗ

При визначенні ОПФ за допомогою ЛППЗ використовується дискретне Фур'є-перетворення згідно співвідношення [15]:

$$\tilde{S}(v'_m) = T \sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \exp\left\{\frac{-j2\pi mk}{N}\right\}, \quad (2.6)$$

де  $T$  – період дискретизації значень ФРЛ;  $S_{x'k}$  – нормоване значення ФРЛ;  $k = 0, 1, 2 \dots N - 1$  – номер відліку у масиві ФРЛ;  $m = 0, 1, 2 \dots$  – номер дискретного значення просторової частоти;  $x'$  – лінійна координата в площині зображення.

З урахуванням (1.4) та формули Ейлера МПФ, як модуль ОПФ дорівнює:

$$|\tilde{S}(v'_m)| = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \cos\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \sin\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2}. \quad (2.7)$$

Для того щоб МПФ об'єктива розрахована із співвідношення (2.7) відповідала її дійсному значенню з припустимими похибками вузол фотометрування повинен задовольняти таким умовам:

- частотна характеристика ЛППЗ не повинна впливати на результати вимірювань;
- похибка, що виникає внаслідок осереднення значень освітленості чутливими елементами ЛППЗ не повинна перевищувати припустиму;
- спотворення спектру сигналу, що виникає внаслідок накладання спектру шумів не повинно перевищувати припустимої величини.

Впливу частотної характеристики ЛППЗ на результат вимірювання МПФ можна уникнути, якщо ФРЛ  $S_{x'k}$  дискретизувати з досить високою частотою. Одним з засобів підвищення ступеня дискретизації є

використання у вузлі фотометрирування мікрооб'єктива із збільшенням  $\beta$ , яке знаходиться із співвідношення [16]:

$$\beta \geq \nu_{max} 2T,$$

де  $\nu_{max}$  – максимальна просторова частота об'єктива, що досліджується;  
 $T$  – період дискретизації чутливих елементів ЛППЗ.

### 2.2.2. Визначення параметрів вузла фотометрирування

Одним з засобів знаходження параметрів вузла фотометрирування, щоб задовольнити вимогам необхідної дискретизації ФР є комп'ютерне моделювання. При розробці математичної моделі процесу вимірювань ФРЛ об'єктива була апроксимована залежністю [15]:

$$S_{x'} = \exp \left\{ - \left( \frac{x'}{\beta 2\rho} \right)^2 \right\},$$

де  $\rho$  – коефіцієнт апроксимації;  $x'$  – лінійна координата в площині ЛППЗ.

Було враховано, що існує залежність між коефіцієнтом апроксимації  $\rho$  та радіусом кола  $E_1$  для об'єктива. З (1.1) слідує, що  $\rho = 0,36\rho_e$ , де  $\rho_e$  знаходиться за формулою [7]:

$$\rho_e = 1,22 \frac{\lambda f'}{D}, \quad (2.8)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі світла;  $f'$  – фокусна відстань об'єктива;  $D$  – діаметр вхідної зіниці об'єктива.

В математичній моделі були прийняті різні значення  $\rho$ , які відповідали певним типам об'єктивів, що підлягали дослідженню. Оскільки в загальному випадку, внаслідок існування несиметричних аберацій, ФРЛ може бути несиметричною, то ліва і права частина функції апроксимації будувалися окремо із своїм коефіцієнтом  $\rho$ . Вплив

збільшення мікрооб'єктива враховувався за допомогою коефіцієнта  $\beta$  згідно виразу:

$$S_{x'_0} = \exp \left\{ - \left( \frac{x'}{\beta \cdot 2\rho} \right)^2 \right\}.$$

Таким чином був здійснений перехід від площини ЛППЗ до фокальної площини об'єктива, що підлягав дослідженню. Основними параметрами ЛППЗ, що моделювалися, були кількість чутливих елементів  $N$  та період їх слідування. Модуль ОПФ розраховувався із співвідношення (2.7), як дискретне  $N$ -точкове перетворення Фур'є. Моделювання процесу осереднення ФРЛ в межах чутливого елемента відбувалось шляхом збільшення крапок у дискретному Фур'є-перетворенні до  $10N$ .

Для визначення ідеальної МПФ<sub>0</sub> використовувалась матриця значень вибраної апроксимуючої кривої ФРЛ з  $10N$ -точковим перетворенням Фур'є. Потім на ділянці ФРЛ, що відповідала 10 крапкам знаходили середнє значення апроксимуючої функції, приймали його сталим для кожного чутливого елемента і скориставшись  $N$ -точковим перетворенням Фур'є обраховували реальне значення МПФ<sub>p</sub>. Відхилення значень реальної МПФ<sub>p</sub> від ідеальної МПФ<sub>0</sub> характеризувало похибку вимірювань і обраховувалось за формулою:

$$A = \frac{|МПФ_0 - МПФ_p|}{МПФ_0} \cdot 100\%. \quad (2.9)$$

Математичне моделювання передбачало також аналіз впливу випадкових шумів на результати визначення МПФ. Модель впливу шуму передбачала накидання на корисний сигнал шумових складових у вигляді гармонічних функцій із змінними амплітудами і фазами за формулою:

$$S_{x'} = \exp \left[ - \left( \frac{x'}{\beta \cdot 2\rho} \right)^2 \right] + a \cdot \sin x',$$



де  $a$  – амплітуда шумів.

Похибка визначення МПФ обраховувалась за формулою аналогічною (2.9), де  $МПФ_0$  і  $МПФ_p$  відповідало значенням цієї функції при відсутності і наявності шумової складової.

Під час комп'ютерного моделювання роботи вузла фотометрирування використовувались такі значення змінних параметрів:

- апроксимуючий коефіцієнт  $2\rho = 10; 15; 20; 25; 30$ ;
- період слідування чутливих елементів ЛППЗ  
 $T = 9; 11; 13; 20; 25 \text{ мкм}$  (відповідали приладам, що виготовляють фірми Sony; Kodak; Hamamatsu; Fairchild Image для різних спектральних діапазонів);
- амплітуди шумів  $a = 0,005 \dots 0,1$  від максимального нормованого значення ФРЛ;
- рівні обмеження вихідного сигналу  $0,005 \dots 0,1$  від максимального нормованого значення ФРЛ;
- максимальна можлива похибка визначення МПФ – 2%.

В результаті проведеного моделювання була отримана серія номограм для різних типів ЛППЗ. На рис. 2.11 представлена одна з номограм за допомогою якої можна визначити необхідне значення збільшення мікрооб'єктива у вузлі фотометрирування при використанні ЛППЗ з періодом слідування чутливих елементів  $T = 9$  мкм. Для користування номограмами слід попередньо розрахувати за співвідношенням (2.8) значення радіусу кола  $E_r$  об'єктива, що підлягає дослідженню, потім визначити коефіцієнт апроксимації  $\rho$  і з використанням допоміжної прямої по шкалі  $\beta$  знайти необхідне значення збільшення мікрооб'єктива. При цьому похибка визначення МПФ, що обумовлена розглянутими факторами не перевищуватиме 2%. Як приклади

на номограмах знайдені значення  $\beta$  для коефіцієнтів апроксимації  $2\rho = 10, 15, 20, 30, 40$  мкм.

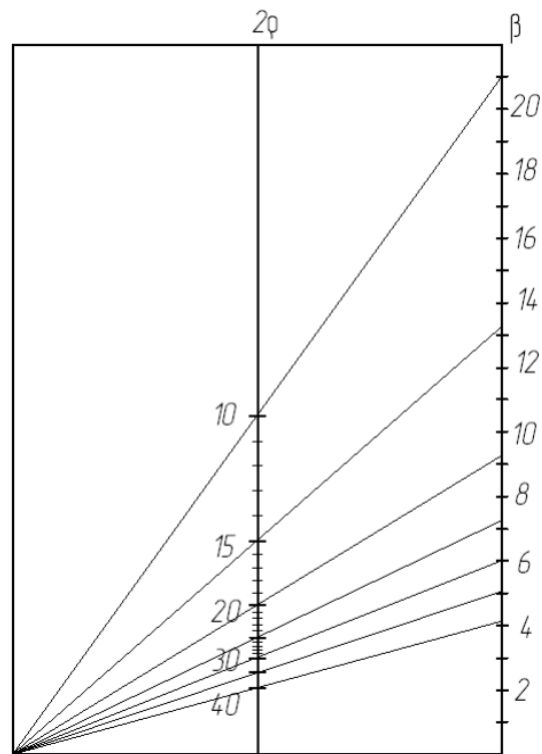


Рис. 2.11. Номограма для визначення збільшення мікрооб'єктива

Комп'ютерне моделювання впливу шумової складової сигналу на похибку визначення МПФ дало такі результати. Якісна залежність зміни похибки вимірювання МПФ від просторової частоти при певному рівні обмеження зберігається для ЛППЗ з різними періодами слідування чутливих елементів. Припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дозволяють зменшити похибку визначення МПФ не повинні перевищувати 0,01 максимального нормованого значення ФРЛ. Із збільшенням рівня обмеження максимум похибки визначення МПФ зсувається в бік більш високих просторових частот. За допомогою обмеження рівня вихідного сигналу найбільш суттєво можна компенсувати похибку визначення МПФ в зоні середніх і високих просторових частот. Як приклад на рис. 2.12, а-г наведено отримані в результаті моделювання залежності зміни похибки

визначення МПФ від просторової частоти для ЛППЗ з періодом  $T = 25\text{мкм}$ , коефіцієнтом апроксимації  $2\rho = 10$ , збільшенням мікроскопа  $\beta = 40\times$  і рівнях обмеження вихідного сигналу, що складав  $0,005\dots 0,01$  від максимального нормованого значення ФРЛ.

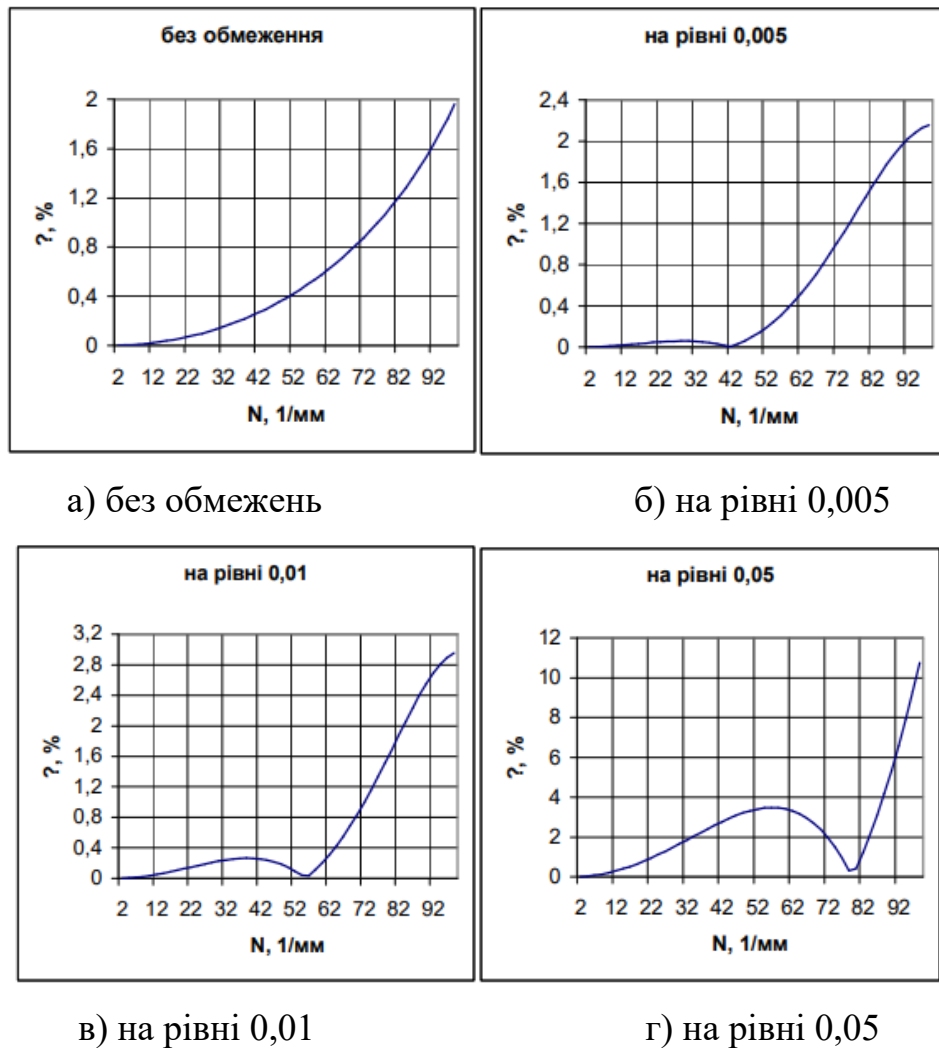


Рис. 2.12. Залежність похибки визначення МПФ від рівня обмеження вихідного сигналу ЛППЗ

Таким чином проведене комп'ютерне моделювання дозволило отримати результати, що дозволяють визначити необхідне значення збільшення мікроскопа  $\beta$  у вузлі фотометрирування стенду

вимірювання МПФ, а також визначити припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дають можливість зменшити похибку вимірювання МПФ.

Установки з ЛППЗ можуть бути використані для контролю якості зображення об'єктів, що працюють у видимій і ближній інфрачервоній області спектру. Для контролю об'єктів у дальній інфрачервоній області спектру треба використовувати приймачі на основі пірокамери або мікроболометрів.

## **2.3. Установки контролю якості зображення об'єктів з використанням мікроболометричних матриць**

### **2.3.1. Установки з використанням мікрооб'єктива**

Для контролю якості зображення об'єктів що працюють в далекій інфрачервоній області спектру використовують установки, де фотоприймачем є пірокамери або мікроболометричні матриці [17,18]. Це стосується об'єктів тепlopеленгаторів, тепловізорів, приладів інфрачервоної техніки і т. і. В якості коліматорів в таких установках використовують, як правило, дзеркальні параболічні об'єктиви. Схема установки представлена на рис. 2.13. Установка містить такі елементи: 1 – випромінювач (глобар); 2 – конденсор; 3 – обертаюча призма; 4 – додатковий конденсор; 5, 6 – світлофільтри ; 7 – тест-об'єкт у вигляді щілини; 8 – коліматорний об'єктив; 9 – об'єктив, що випробується; 10 – мікрооб'єктив; 11 – мікроболометрична телевізійна камера; 12 – електронний блок; 13 – формувач відеосигналу; 14 – аналого-цифровий перетворювач; 15 – інтерфейс; 16 – комп'ютер, що виконує дискретне

перетворення Фур'є і документує результати виміру; 17 – поворотний стіл для оцінки якості зображення по центру і по краях поля зору.

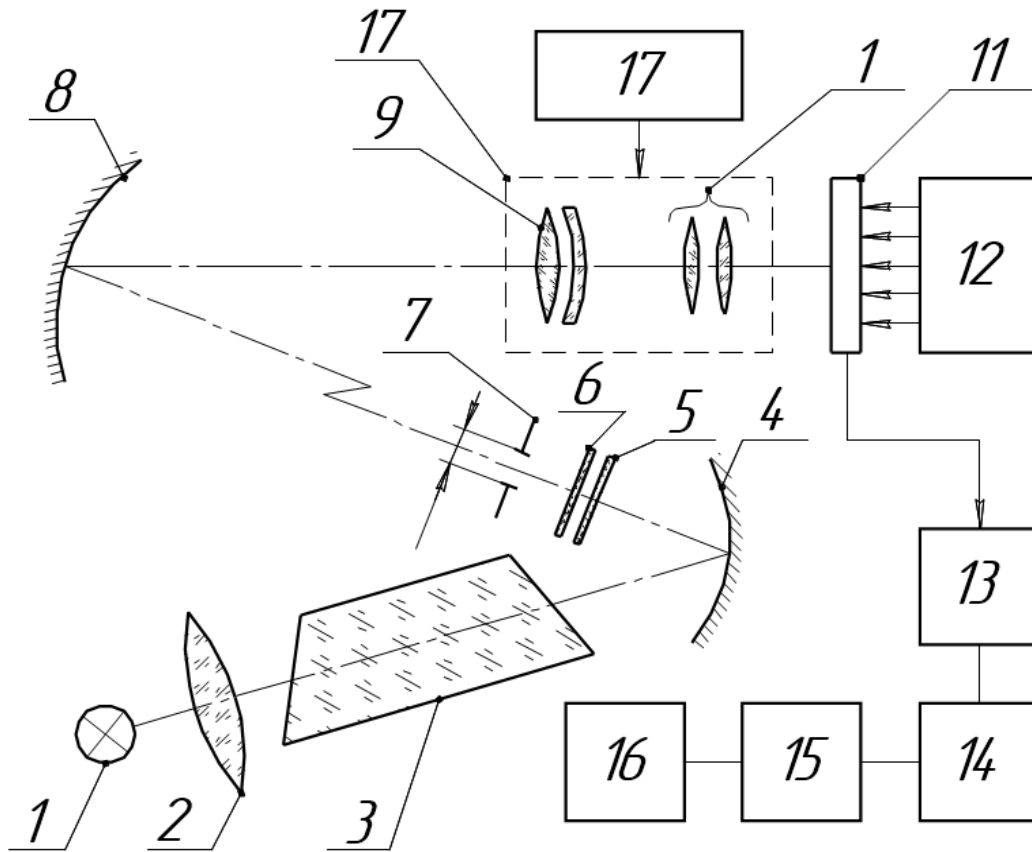


Рис. 2. 13. Схема установки для контролю якості об'єктивів

Загальний вигляд установки показаний на фотографії рис. 2.14.



Рис. 2.14. Загальний вигляд установка контролю якості об'єтивів

На фотографії рис. 2.15 показаний блок тест-об'єкта установки.



Рис.2.15. Блок тест об'єкта установки

На фотографії рис. 2.16 показаний фотоприймальний блок установки на базі мікроболометричної матриці

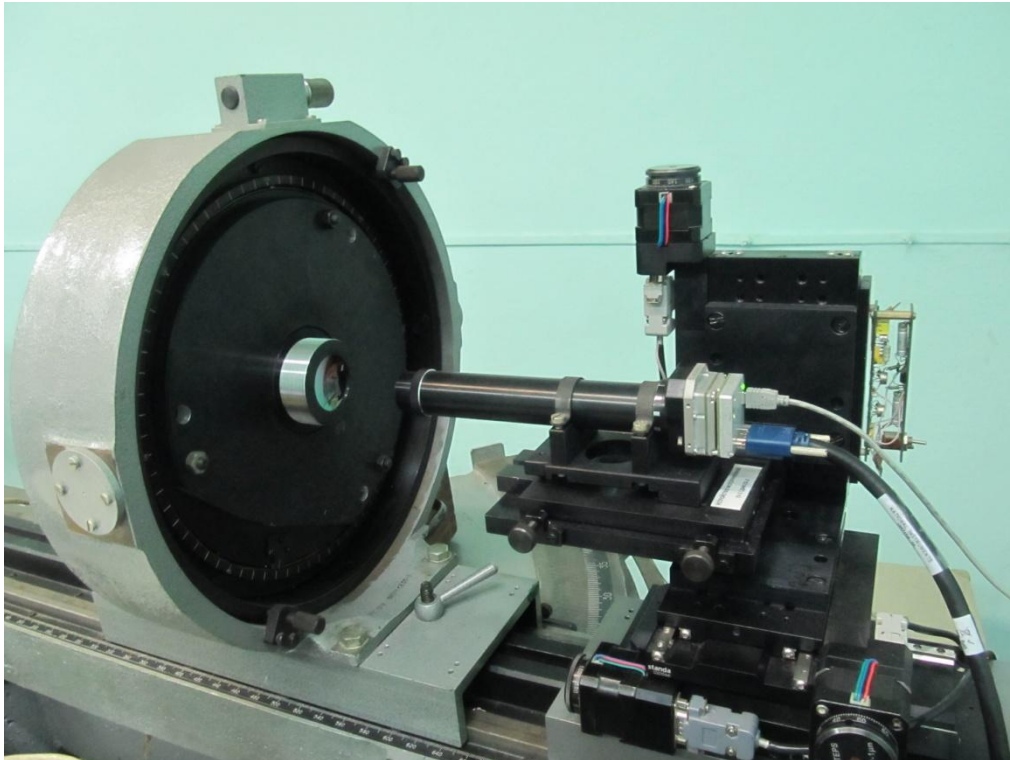


Рис. 2.16. Фотоприймальний блок установки

Однією з суттєвих проблем при розробці установок для контролю якості інфрачервоних об'єктивів є обмежена номенклатура проєкційних мікрооб'єктивів з необхідною якістю зображення. Перелік матеріалів з яких виготовляють об'єктиви цього спектрального діапазону малий, що не дозволяє скомпенсувати аберації оптичної системи. В зв'язку з цим були запропоновані варіанти побудови установок без використання проєкційних мікрооб'єктивів при дотриманні необхідної точності визначення ОПФ.

### 2.3.2. Установки з поворотом зображення тест-об'єкта і мікроскануванням

На рис. 2.17 показана схема установки, в якій фотоприймальний пристрій або зображення тест-об'єкта здійснюють взаємний поворот на певний кут  $\gamma$ [1,2].

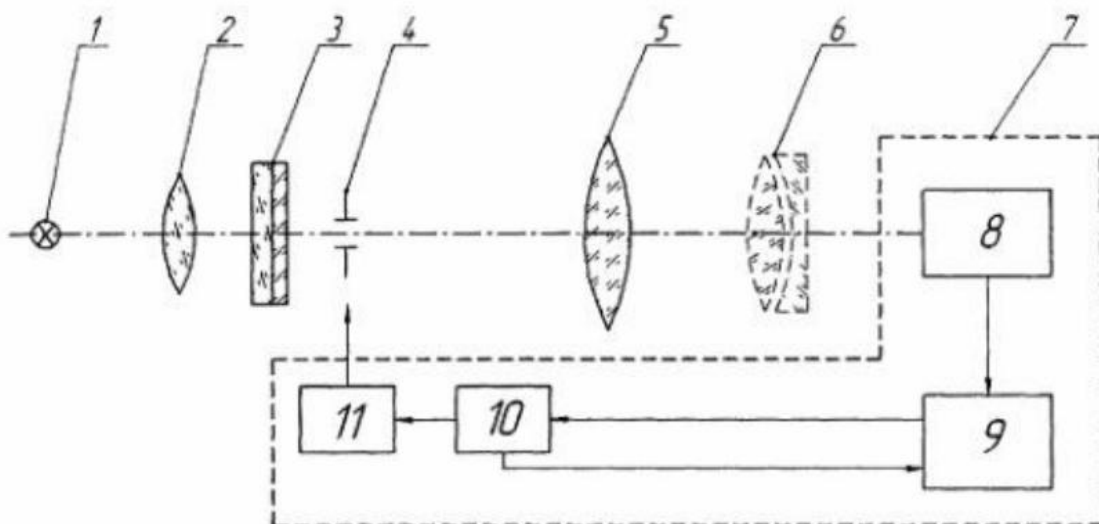


Рис. 2.17. Функціональна схема установки з поворотом зображення тест-об'єкта

Установка містить такі елементи: 1 – випромінювач; 2 – конденсор; 3 – світлофільтри; 4 – тест-об'єкт; 5 – коліimatorний об'єктив; 6 – об'єктив, що контролюється; 7 – блок аналізу та перетворення зображення в електричний сигнал; 8 – мікроболометрична телевізійна камера; 9 – ЕОМ; 10 – кроковий двигун; 11 – механічний привод.

В початковому положенні тест-об'єкт встановлено перпендикулярно відносно оптичної вісі, потім тест-об'єкт повертається на граничний кут  $\gamma$  за допомогою крокового двигуна з механічним приводом. З мікроболометричної телевізійної камери знімають отримані дані, які передаються на ЕОМ. ЕОМ здійснює дискретне перетворення Фур'є



вхідної послідовності чисел, результатом якого є ОПФ об'єктива, що контролюється [11].

ЕОМ в залежності від розрахункової роздільної здатності об'єктива, що контролюється, визначає необхідну кількість вимірів, які характеризують розподілення випромінювання в ФР для обчислення складових ОПФ з потрібною точністю. Реально ця кількість відліків обмежена і залежить від ширини функції розсіювання і лінійного розміру пікселя матричного перетворювача.

Наприклад, на рис. 2.18 наведено випадок, коли ФР проектується лише на 4 рядки пікселів матричного приймача. На рис. 2.18 позначено:  $x$  – координата в напрямку рядку матричного приймача, яка відповідає напрямку зчитування розподілу освітленості в ФР;  $l$  – лінійний розмір пікселя вздовж рядку;  $E(x)$  – залежність опромінення від координати  $x$  в ФР. Матричний приймач в межах кожного пікселя осереднює виміряні значення  $E(x)$ . При обмеженій кількості пікселів на які проектується зображення вигляд ФР буде спотворений. Така кількість відліків не дає можливості в подальшому рахувати складові ОПФ з необхідною точністю.

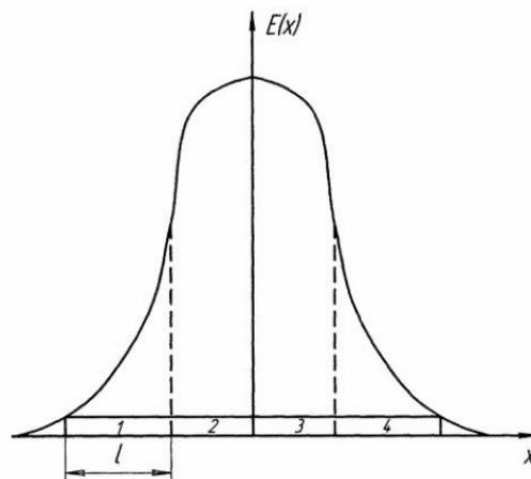


Рис. 2.18. Функція розсіювання проектується лише на чотири рядки пікселів матричного приймача

Для збільшення кількості відліку для того самого розподілу опромінення  $E(x)$  та сталого розміру  $l$  ЕОМ розраховує необхідний кут нахилу  $\gamma$  зображення функції розсіювання відносно стовпчиків матричного приймача. Внаслідок цього взаємне розташування зображення ФР і площини матричного приймача буде мати вигляд приведений на рис. 2.19, де додатково зображені  $y$  – координата в напрямку стовпчиків матричного приймача, та  $h$  – лінійний розмір пікселя вздовж рядка приймача.

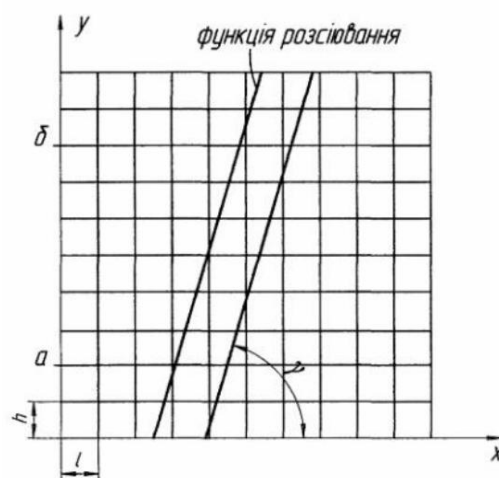


Рис. 2.19. Взаємне розташування зображення тест-об'єкту і площини матричного приймача при повороті

Кожний наступний рядок матричного приймача відтворює зображення ділянки ФР з зсувом, що дорівнює [2]:

$$x_{\text{фр}} = h(\text{tg}\gamma)^{-1},$$

де  $\gamma$  – кут нахилу зображення функції розподілу відносно координати  $x$ .

Щоб отримати повну уяву про вигляд функції розсіювання використовується певна ділянка від  $a$  до  $b$  лінійного розміру матриці вздовж координати  $y$ . Ця ділянка обмежена розміром зображення ФР який залишається сталим вздовж координати  $y$ . Кількість пікселів, які використовуються для визначення залежності  $E(x)$  буде пропорційна

площині взаємного перекриття зображенням ФР та елементів матриці. Враховуючу нерівномірність розподілу опромінення по перерізу ФР у кожному наступному рядку на ділянці від а до б опромінення кожного пікселя вздовж рядку буде змінюватися згідно зміни координати певної точки ФР в напрямку цього рядку.

В подальшому ЕОМ за відповідною програмою робить зшивку отриманих даних вздовж певної кількості рядків та визначає складові ОПФ з необхідною точністю [11]. Замість тест-об'єкта щілини може бути використаний тест-об'єкт у вигляді напівплощини, але принцип вимірювання залишається таким самим [19].

Іншим варіантом підвищення точності вимірювання ОПФ без використання мікрооб'єктива є побудова установки з мікроскануванням в площині зображення функціональна схема якої показана на рис. 2.20.

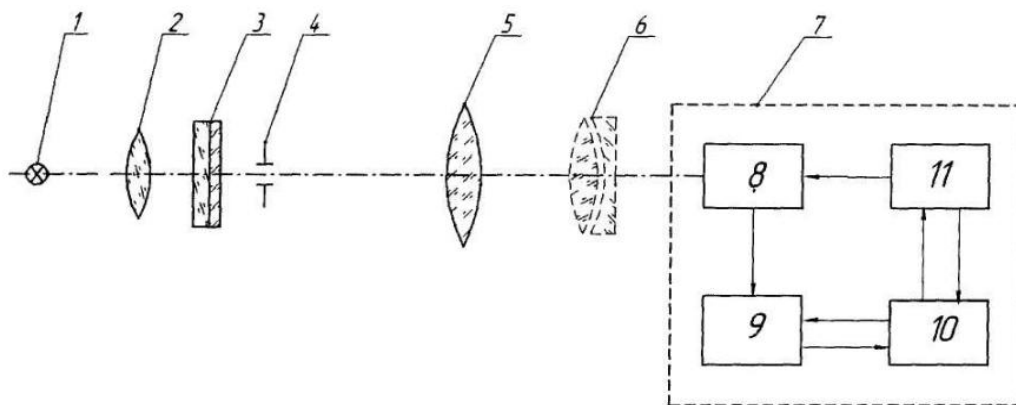


Рис. 2.20. Функціональна схема установки з мікроскануванням

Установка містить такі елементи: 1– випромінювач (глобар) ; 2 – конденсор; 3 – світлофільтри; 4 – тест-об'єкт; 5 – коліimatorний об'єктив; 6 – об'єктив що контролюється; 7 – блок аналізу та перетворення зображення в електричний сигнал; 8 – мікроболометрична камера; 9 – ЕОМ; 10 – контролер; 11 – кроковий двигун.

Кроковий двигун підключено до мікроболометричної камери, що здійснює мікросканування в напрямку, перпендикулярному до зображення тест-об'єкта. З мікроболометричної камери під час мікросканування знімають отримані дані, які передаються на ЕОМ. ЕОМ здійснює дискретне перетворення Фур'є вхідної послідовності чисел, результатом якого є ОПФ об'єктива, що контролюється. ЕОМ в залежності від розрахункової роздільної здатності об'єктива, що контролюється, визначає необхідну кількість кроків мікросканування в площині зображення мікроболометричної камери, які характеризують розподілення випромінювання в ФР для обчислення складових ОПФ з потрібною точністю.

В даному пристрої під час вимірювання фотоприймач покроково зсувається на частину розміру чутливого елемента. Цей метод дозволяє збільшити частоту дискретизації у декілька разів. Тоді максимальна частота, яка може бути присутня в МПФ об'єктива, котра не вносить похибок у вимірювання, визначається формулою [20]:

$$v_{max} = v_n = \frac{\beta S}{2p}, \quad (2.10)$$

де  $S$  – кількість зсувів.

Покажемо, що це дійсно так. Дискретну вибірку значень освітленості в зображенні, котрі знімаються за допомогою матричного приймача можна представити у вигляді ґратки  $\delta$ -функцій, вузли якої розташовані у центрах чутливих елементів і мають величину знятого з чутливого елемента сигналу  $q_n$ . Тоді послідовність, що описує сигнал з фотоприймача, запишеться як сума добутків значень сигналу та зсунутої  $\delta$ -функції. А для покрокового мікросканування ми будемо мати декілька таких сум [20]:

$$Q(x) = \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta(x - np) + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - \frac{p}{S}\right) + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - 2\frac{p}{S}\right) + \dots$$

$$+ \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - (S-1)\frac{p}{S}\right) = \sum_{n=0}^{NS-1} q_n \delta\left(x - n\frac{p}{S}\right)$$

Тобто крок слідування  $\delta$ -функцій у гратці зменшується і відповідно збільшується частота дискретизації.

Над такою вибіркою можна здійснити дискретне перетворення Фур'є, що описується виразом:

$$|\tilde{S}(v'_m)| = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} Q(n) \exp\left(\frac{-2\pi i n m}{N}\right), m = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

Нормуючи таку послідовність відносно значення  $\tilde{S}(0)$ , можна отримати значення шуканої МПФ. Однак, слід зазначити, що значення сигналу  $q_n$  для кожного чутливого елементу є інтегрованим по площі цього елементу. Це спричиняє додаткову похибку в результуючому виразі нормованого Фур'є перетворення окрім похибки дискретизації. Таке інтегрування можна описати за допомогою згортки функції розподілу чутливості всередині одного елементу  $h(x)$  з функцією розсіювання лінії  $A(x)$ . Тоді значення сигналу в центрі чутливого елементу з номером  $n$  буде дорівнювати:

$$q_n = h(np) \otimes A(np).$$

Таким чином дискретне перетворення Фур'є цієї послідовності дорівнюватиме добутку Фур'є перетворень цих двох функцій:

$$S(q_n) = S\{h(x)\} S\{A(x)\}.$$

Фур'є перетворення функції  $A(x)$  є шуканою МПФ об'єктиву, що досліджується, за яку можна прийняти отримані значення, якщо вплив

функції  $h(x)$  незначний, або ввести корегуючий коефіцієнт, що дорівнює  $K = \{S[h(x)]\}^{-1}$ .

Тоді добуток  $S(q_n)K$  і буде шуканою МПФ [20].

Функція розподілу чутливості в середині одного елемента в найпростішому випадку з точністю до постійного коефіцієнту може бути представлена прямокутною функцією. А її Фур'є-перетворення визначається sinc-функцією. Графік цієї функції приведено на рис. 2.21. Як видно з графіка в точках  $\nu = \frac{\beta}{p}k, k \in Z$  функція  $\text{sinc}(\nu)$  набуває нульового значення, що призводить до різкого зростання коефіцієнту  $K(\nu) = \frac{1}{\text{sinc}(\frac{\nu p}{\beta})}$  в околі цих точок і, якщо вводиться корегуючий коефіцієнт, то слід виключити такі точки з корекції.

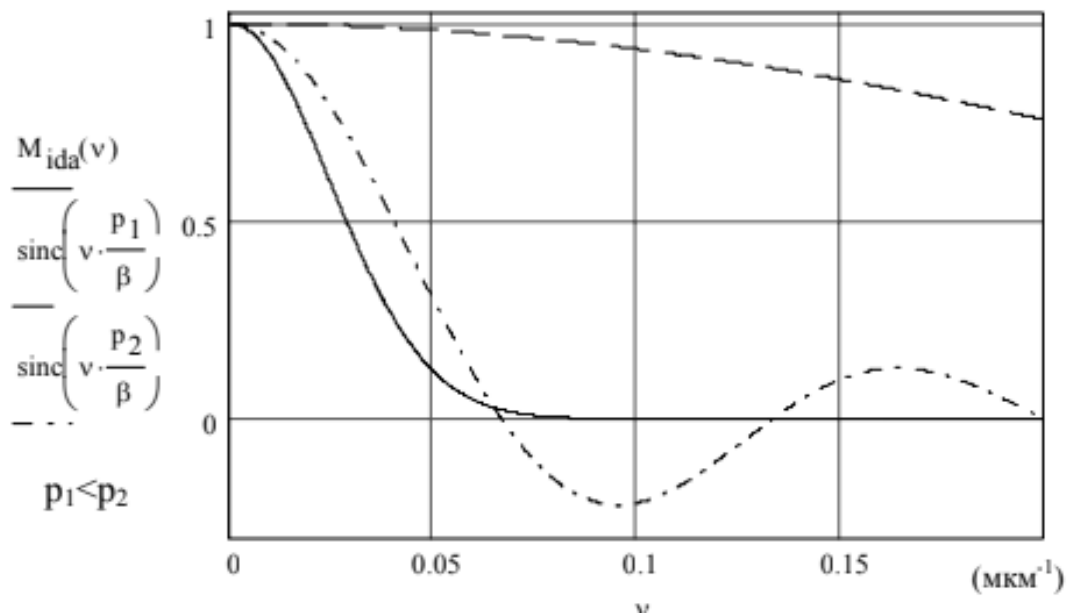


Рис. 2.21. Спектри функції чутливості одного елемента для двох різних розмірів чутливих елементів у порівнянні з МПФ об'єктиву, що досліджується

З формули (2.10) можна знайти кількість зсувів, котрі необхідно здійснити для того, щоб установка розділяла частоту  $\nu_{max}$ :

$$C = \text{round} \left( \frac{v_{max} 2p}{\beta} \right), \quad (2.11)$$

де  $\text{round}(x)$  – функція, що відкидає дробову частину  $x$ .

Як відомо МПФ абераційного об'єктиву не перевищує МПФ дифракційно обмеженого. Для дифракційно обмеженого об'єктива ФР можна апроксимувати функцією Гауса з врахуванням радіусу кружка Ері, що можна врахувати і при одномірному моделюванні. Відповідно можна знайти й МПФ цієї апроксимації у аналітичному вигляді. Таким чином, врахувавши вирази для апроксимацій ФР та МПФ дифракційно обмеженого об'єктива, можна записати остаточний вираз для максимальної частоти, що може бути присутня в спектрі ФР:

$$v_{max} = 1,1 \frac{D/f}{\lambda}. \quad (2.12)$$

Підставляючи отримане значення з (2.12) у формулу (2.11) для визначення мінімально необхідної кількості кроків отримаємо:

$$C = \text{round} \left( 1,1 \frac{D/f}{\lambda} \frac{2p}{\beta} \right). \quad (2.13)$$

Обмеження по кількості елементів спричиняє дискретність відліків ОПФ з періодом  $1/N_p$ . Однак при недостатньо великій вибірці легко збільшити кількість елементів, доповнивши вибірку елементами з нульовими відліками, що дозволяє звести нанівець цей тип похибки.

Для підтвердження отриманих теоретичних результатів було проведено комп'ютерне моделювання. Моделювання проводилось при таких числових даних:

- робоча довжина хвилі 8 мкм;
- відносний отвір об'єктива, який досліджується 1:4;
- радіус кола Ері 5,856 мкм;
- збільшення мікрооб'єктива 1;

– відстань між елементами матриці	20 мкм;
– кількість елементів матриці	512;
– розподіл чутливості в середині елемента	$h(x) = \text{rect}(x/p)$ ;
– кількість кроків мікросканування	4;
– розмір кроку	4 мкм.

Значення сигналу з приймача, з точністю до постійного множника приведені на рис. 2.22 у співвідношенні з апроксимованою ФР у площині приймача. У зв'язку з цим  $f(x)$  відображає апроксимовану функцію розсіювання,  $FRL$  – значення на виході приймача без здійснення мікросканування та  $FRL_z$  – значення на виході приймача при здійсненні чотирьох крокового мікросканування.

Під час моделювання було досліджено можливість підвищення точності визначення МПФ при здійсненні мікросканування. Тобто, змінюючи кількість кроків мікросканування при сталих вихідних параметрах, були визначені відповідні МПФ. Таким чином внаслідок числового моделювання отримані чотири послідовності МПФ:  $Mida(v)$  – значення МПФ, що отримані згідно з аналітичним виразом Фур'є перетворення апроксимації ФР;  $M(v)$  – значення МПФ без здійснення мікросканування;  $M_z(v)$  – значення МПФ при мікроскануванні з відповідною кількістю кроків;  $M_{cor}(v)$  – значення МПФ при мікроскануванні та з введенням корегуючого коефіцієнту. На рис. 2.23 приведені співвідношення цих МПФ при двокроковому мікроскануванні. При цьому видно, що така кількість кроків не забезпечує достатнього підвищення точності вимірювання МПФ.



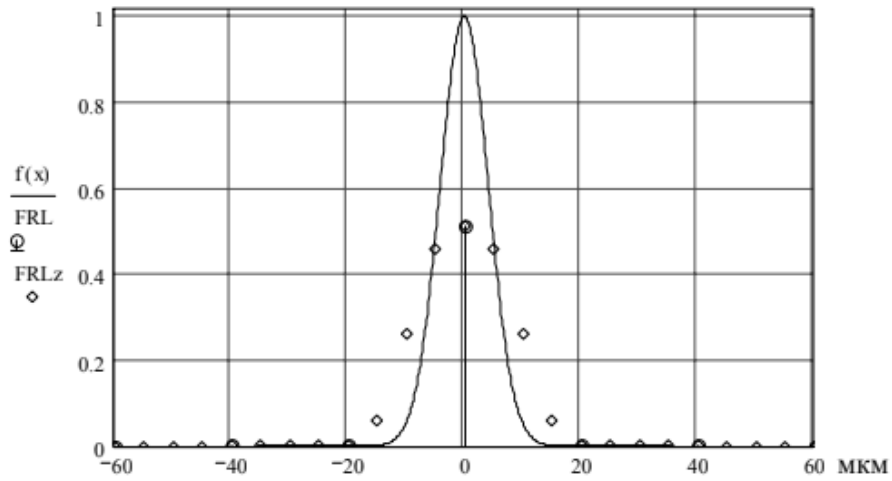


Рис. 2.22. Функція розсіювання в площинні приймача та значення на виході приймача без мікросканування та з мікроскануванням

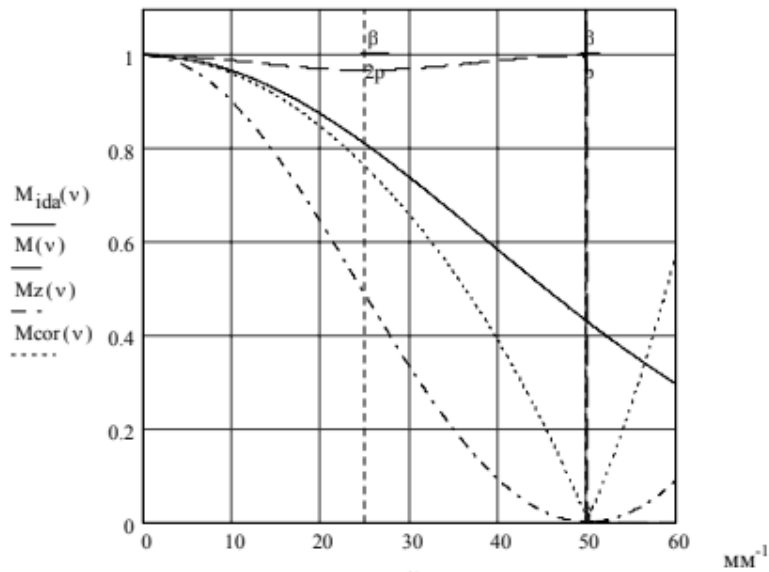


Рис. 2.23. Вигляд МПФ при двокроковому мікроскануванні у порівнянні з аналітичною МПФ

На рис. 2.24 приведені результати, отримані при чотирьохкроковому мікроскануванні. Така кількість кроків розрахована за формулою (2.13)

при числових даних прийнятих для моделювання і відповідає мінімально необхідній кількості кроків для даного випадку.

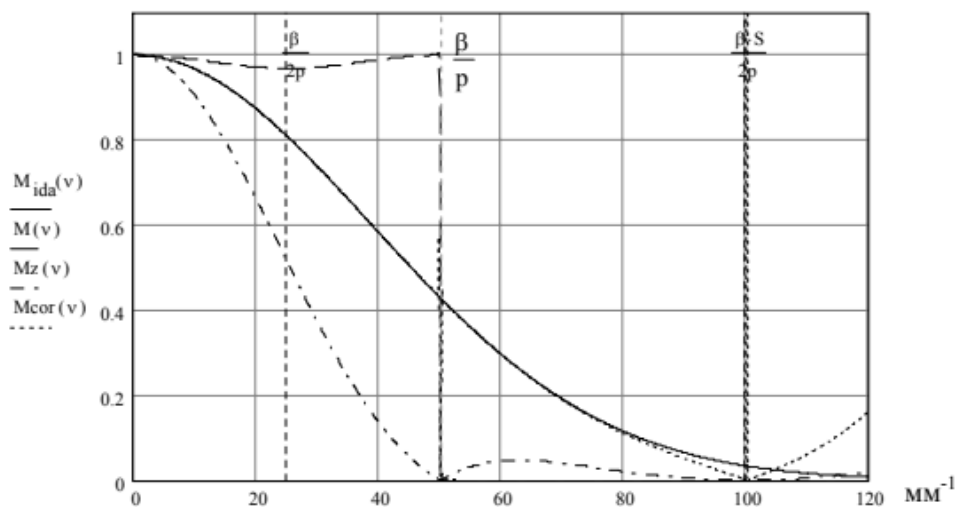


Рис. 2.24. Вигляд МПФ при чотирикроковому мікроскануванні у порівнянні з аналітичною МПФ

На рис. 2.25 приведена похибка визначення МПФ відносно аналітичного виразу. З цих рисунків видно, що дана кількість кроків мікросканування є достатньою та значно підвищує точність визначення МПФ.

Аналіз залежностей, приведених на рис. 2.24 і рис. 2.25 свідчить про те, що збільшення кількості кроків мікросканування до числа мінімально необхідної кількості зводить похибку визначення МПФ до нехтовно малої величини. Для порівняння слід відзначити, що похибка визначення МПФ при двокроковому мікроскануванні складає, наприклад, 0,2 відн. од. на частоті  $\nu = 40 \text{ мм}^{-1}$  (див. рис. 2.23), а взагалі при відсутності мікросканування на тій самій частоті вона складає 0,45 відн. од.

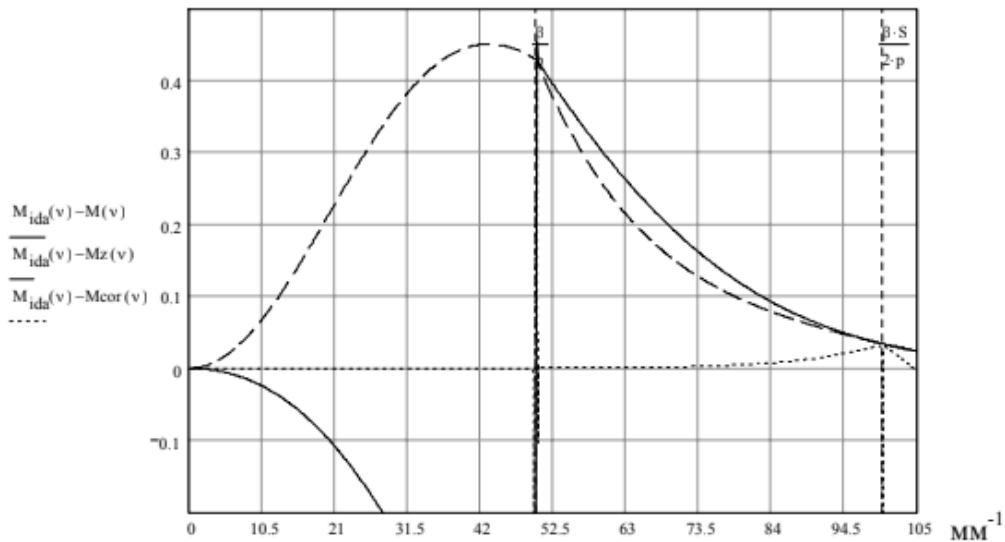


Рис .2.25. Похибка визначення МПФ при чотирикровоковому мікроскануванні

Таким чином комп'ютерне моделювання підтвердило ефективність використання мікросканування для підвищення точності визначення МПФ. Визначення мінімально необхідної кількості кроків за формулою (2.13) дозволить зменшити час вимірювання, а в деяких випадках й спростити конструкцію пристрою високоточного позиціювання з використанням крокових або п'єзодвигунів.

## РОЗДІЛ 3

### ФАКТОРИ ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ

Для оцінки точності установок контролю якості зображення об'єктивів застосовують два методи.

Перший метод полягає в тому, що в якості випробовуваних оптичних систем беруть прості оптичні системи, параметри кола розсіювання яких можуть бути визначені розрахунковим шляхом. Потім порівнюють результати розрахунку з результатами вимірів, визначаючи похибку установки. Стандартом визначені два види таких простих систем:

- до короткофокусних відноситься проста плоскоопукла лінза з фокусною відстанню  $f' = 50$  мм;
- до довгофокусних відноситься склеєний об'єктив з фокусною відстанню  $f' = 200$  мм.

Другий метод полягає в аналізі похибок окремих вузлів установки. Такі похибки можуть бути двох типів. До випадкових відносяться:

- відхилення ширини тест-об'єкта від номіналу;
- неперіодичність тест - об'єкта;
- нестабільність частоти обертання модулятора;
- похибки механічних вузлів фокусування;
- нестабільність потоку джерела випромінювання;
- нелінійність фотоприймача, підсилювача, аналізатора гармонік.

Для боротьби з випадковими похибками використовується збільшення кількості вимірів з наступною статистичною обробкою результатів вимірювання.

До систематичних відносяться:

- можлива когерентність джерела в схемі вимірювальної установки;
- вплив профілю тест - об'єкта;
- вплив кінцевої ширини аналізуючої щілини і похибки її вимірювання;
- вплив додаткових вузлів вимірювальної установки;
- похибки градування вимірювальної установки.

Вплив систематичних похибок слід враховувати в результатах вимірювань шляхом введенням поправок в ході вимірів.

Розглянемо більш детально деякі систематичні похибки.

### **3.1. Вимоги до освітлювальної системи установки**

#### **3.1.1. Вимоги до джерела і коліimatorного об'єктива**

Основними вузлами освітлювальної системи установки контролю якості зображення об'єктивів є: джерело випромінювання, коліimatorний об'єктив, тест-об'єкт. Розглянемо питання пов'язані з впливом цих елементів на точність вимірювання ОПФ.

Поняття ОПФ використовується для лінійних зображуючих систем, зокрема оптичних. Якщо ці системи вважати лінійними за інтенсивністю, то можна визначати інтенсивність (освітленість) в точці зображення за допомогою підсумовування «внесків» яскравості окремих точок об'єкта. Коли об'єктом служить безпосередньо джерело, яке світиться, то ми маємо повністю некогерентне освітлення, коли кожна точка тіла накалу випромінює світло у вигляді цугів хвиль кінцевої довжини, розділених випадковими по тривалості проміжками часу. Оскільки від різних точок

об'єкту в кожену точку зображення приходять коливання (скажімо, однієї і тієї ж частоти) з випадковим співвідношенням між їх початковими фазами (причому за час, необхідний для спостереження та вимірювання інтенсивності світла, встигає накладатися один на одного безліч цугів хвиль), різниця фаз цугів змінюється хаотично, а реєструється лише середнє значення цієї різниці. Таким чином, хвилі від різних точок тіла розжарювання не можуть інтерферувати один з одним, і їх «внески» в інтенсивність можна підсумувати в точці зображення.

Установки для вимірювання передавальних функцій оптичних систем включають освітлювальну систему, що встановлена перед тест-об'єктом тієї чи іншої форми, досліджувану систему і аналізуючий блок, встановлений в тій площині, де досліджувана система створює зображення тест-об'єкта. Освітлювальна система показана на рис. 3.1 [21].

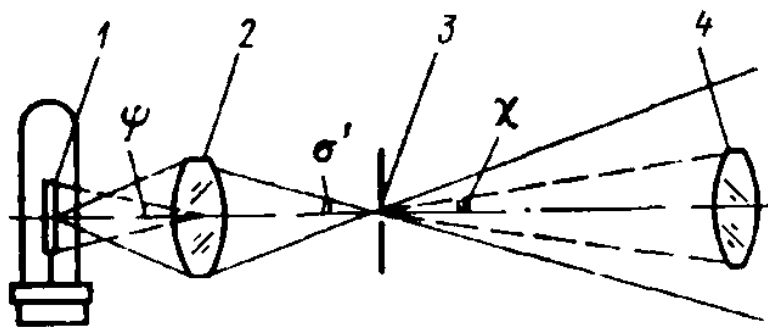


Рис. 3.1. Освітлювальна система вимірювальної установки

На рис. 3.1 показано: 1 – джерело випромінювання; 2 – конденсор; 3 – тест-об'єкт; 4 – коліматорний об'єктив. В такому випадку світло від кожної точки джерела потрапляє вже на кінцеву область тест-об'єкта, яка пов'язана з розмірами плями розсіювання конденсора. Світлові хвилі від точок тест-об'єкта, лежать в межах цієї області, мають спільне «походження» і можуть інтерферувати один з одним в площині

зображення, і тому тест-об'єкт виявляється освітленим частково когерентно. Розглянемо, яким умовам повинні задовольняти конденсор та інші елементи освітлювача для забезпечення достатньої некогерентності освітлення.

Для випадку часткової когерентності вводиться величина  $\gamma$  – ступінь когерентності ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ). Значення  $\gamma = 0$  відповідає випадку некогерентних світлових пучків, що складаються по інтенсивності, а  $\gamma = 1$  – випадок повністю когерентних пучків, що інтерферують один з одним. Розрахунок області когерентності пояснює рис. 3.2.

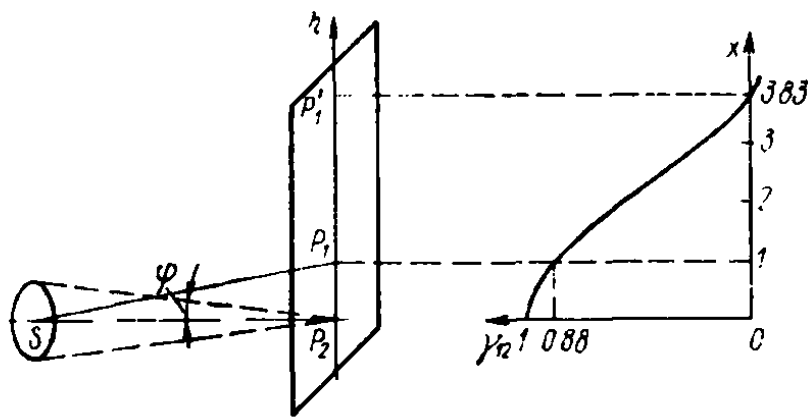


Рис. 3.2. До розрахунку області когерентності

Ступінь когерентності  $\gamma$  характеризує кореляцію (узгодженість, близькість по амплітуді і фазі) коливань в точці  $P_1$ , з коливаннями в точці  $P_2$ , на площині, освітленій протяжним джерелом  $S$ . Якщо розмір джерела світла і відстань між  $P_1$  і  $P_2$  (рис. 3.2) малі в порівнянні з віддаленням цих точок від джерела, то, згідно з відомою теоремою Ван-Цітерта-Церніке, модуль ступеня когерентності  $|\gamma_{12}|$  дорівнює відношенню амплітуд в точках  $P_1$  і  $P_2$  дифракційної картини Фрауенгофера, центр якої знаходиться в точці  $P_2$  і яка виникла внаслідок відхилення паралельних променів світла

на апертурі ідентичній контуру джерела світла. Для випадку однорідного круглого джерела світла отримаємо:

$$|\gamma_{12}| = \left| \frac{2J_1(x)}{x} \right|,$$

де  $J_1(x)$  – функція Бесселя першого роду першого порядку змінної  $x$ , що визначається за формулою:

$$x = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) (P_1 P_1') \psi_1$$

де  $\psi$  – радіус джерела світла в кутовій мірі;  $\lambda$  – довжина хвилі.

Область когерентності близька до повної визначається з умови (див. праву частину рис. 3.2)  $0,88 \leq |\gamma_{12}| \leq 1$ , де  $|\gamma_{12}| = 0,88$  відповідає  $x = 1$ , тобто діаметр області когерентності [21]:

$$h = P_1 P_2 = \frac{x\lambda}{2\pi\psi} = 0,16\lambda\psi. \quad (3.1)$$

Поза цієї області існує ще часткова когерентність, падаюча до нуля при

$$h' = P_1' P_2 = \frac{3,83\lambda}{2\pi\psi} = 0,61\lambda\psi. \quad (3.2)$$

За межами області діаметром  $h'$  ступінь когерентності так мала, що не має практичного значення. За формулами (3.1) і (3.2) можна оцінити ступінь часткової когерентності, що виникає на різних компонентах оптичної схеми установки, що вимірює ОПФ об'єктива.

До коліimatorного об'єктива пред'являються строгі вимоги, тому що він повинен вносити мінімум похибки в вимірювання і його фокусна відстань повинна бути як мінімум в 5÷6 разів більше фокусної відстані випробуваного об'єктива. Якщо у схемі використовується дзеркальний коліimatorний об'єктив з параболічним дзеркалом, він повинен мати досить високу якість створюваного ним зображення і вносити таку частку похибки, щоб нею можна було знехтувати у сумарній похибці



вимірювання МПФ інфрачервоних об'єктивів. Параболічне дзеркало-коліматор має малу середньоквадратичну деформацію поверхні, основний вклад у неї вносить астигматизм. Коліматорний об'єктив обов'язково має світловий діаметр, більший (за діючими стандартами на 10 % або більше), ніж досліджувана система. Що стосується аберацій лінзового коліматорного об'єктива, то найбільш суттєва з них – хроматична аберація положення яка досить значна. Сферична аберація коліматора зазвичай мала через його невисоку світлосилу, а польові аберації і зовсім відсутні, так як тест-об'єкт займає, як правило, лише центральну частину поля зображення коліматора.

Хроматизм лінзового коліматора у використуваному спектральному діапазоні розглядають як подовжне розфокусування, залежне від довжини хвилі, математично пов'язуючи його з спотворенням плоского хвильового фронту, який формується коліматором і діє на вхідну зіницю досліджуваної системи. Скористаємося для цього відомою формулою, яка зв'язує стрілку  $h$  сегмента з радіусом, що дорівнює фокусній відстані коліматорного об'єктива  $f_k$  (рис. 3.3, *a*),  $h = (D/2)^2/(2f_k)$ , де  $D$  – довжина хорди.

Взявши похідну від цієї формули, знаходимо, що подовжньому зміщенню центру дуги на  $\delta f$  відповідає наступне спотворення сферичного хвильового фронту  $\delta h$  [21]:

$$\delta h = \frac{(D/2)^2}{2f_k^2} \delta f = \frac{D^2}{8f_k^2} \delta f$$

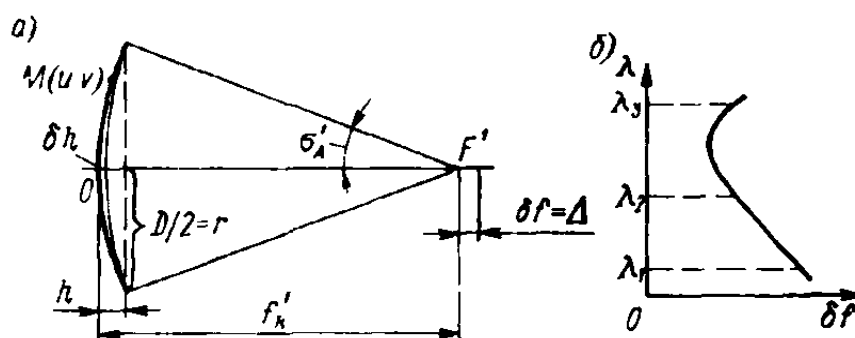


Рис. 3.3. До розрахунку допустимого хроматизму коліimatorного об'єктива

Якщо прийняти, що  $\delta f = \lambda/4$ , то подовжнє розфокусування

$$\delta f = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{4} \frac{8f'_k{}^2}{D^2} = \frac{\lambda}{2} \frac{f'_k{}^2}{D^2} = \frac{\lambda}{2 \sin^2 \sigma'_A}$$

Допустиму хвильову аберацію через хроматизм положення коліimatorа доцільно прийняти рівною  $\lambda/2$ , тобто половині середньої довжини хвилі використовуваного спектрального діапазону. Оскільки вказане значення відноситься лише до меж діапазону, то в разі лінійної залежності хроматизму від довжини хвилі (діапазон  $\lambda_1 \div \lambda_2$  на рис.3.3, б) середня хвильова аберація не перевершує значення  $\lambda/4$ , що відповідає критерію Релея. А в важливому окремому випадку, коли хроматизм коліimatorного об'єктива представлений вторинним спектром, тобто коли актинічний світловий потік обмежений областю ахроматизації об'єктива  $\lambda_2 \div \lambda_3$  (рис. 3.3, б), ця аберація ще менше.

Приймаючи, як зазначено вище,  $\delta h = \lambda/2$  і  $\delta f = \Delta$ , де  $\Delta$  – подовжня хроматична аберація, маємо:  $\Delta = \lambda [D/(2f'_k)]^2 = \lambda \sin^2 \sigma'_A$ . З цього виразу отримуємо граничні значення характеристик коліimatorного об'єктива, при яких його хроматизм не впливає на результат вимірювання ОПФ досліджуваного об'єктива – фокусної відстані  $f'_k$  і відносного отвору  $D/f'_k$ :

$$f'_k = D \sqrt{\Delta/(4\lambda)}, \quad D/f'_k = \sqrt{4\lambda/\Delta}$$

Зауважимо, що  $D$  – світловий робочий діаметр, який визначається не всім світловим діаметром коліматора, а меншим значенням світлового діаметра випробуваного об'єктива.

Для випадку, коли  $\Delta$  – вторинний спектр, формула приводиться до виду  $f_k = D^2 a / (4\lambda)$ , так як вторинний спектр пропорційний фокусній відстані об'єктива:  $\Delta = a f_k$ , причому коефіцієнт  $a = 1/400 \div 1/2000$  для різних типів об'єктивів-ахроматів. Наприклад, для  $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$  мм при  $a = 1/1000$  виходить просте чисельне співвідношення: найменше припустиме  $f_k = D^2 / 2$ , де  $D$  вимірюється в міліметрах.

Таким чином, якщо для вимірювання ОПФ деякого об'єктива з фокусною відстанню  $f_{об}$  використовуються замість двохлінзових ахроматів коліматорні об'єктиви зі зменшеним хроматизмом  $\Delta$  (наприклад, лінзові апохромати або, що ще краще, дзеркальні об'єктиви), то вони можуть бути більш короткофокусними, тобто відношення  $f_k / f_{об}$  допустимо вибрати меншим.

### 3.1.2. Вимоги до тест-об'єкта

Тест-об'єкт також вносить свою частку похибки в результат вимірювання МПФ випробуваного об'єктива. В теорії як тест-об'єкт використовується нескінченна тонка лінія. В ході проектування стенду для вимірювання МПФ виникає потреба з енергетичних міркувань збільшувати ширину щілинної діафрагми, що призводить до того що МПФ тест-об'єкта при збільшенні просторової частоти поступово зменшується і може бути визначена за співвідношенням [22]:

$$L(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-j2\pi\nu x} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{b} e^{-j2\pi\nu x} dx =$$

$$= \frac{1}{b} \frac{e^{-j\pi\nu b} - e^{j\pi\nu b}}{-j2\pi\nu} = \frac{\sin(\pi\nu b)}{\pi\nu b},$$

де  $b$  – ширина щілинної діафрагми в фокальній площині коліматора.

В площині фотоприймача ширина зображення щілинної діафрагми дорівнює:

$$b' = \frac{f'_{об}}{f'_{кол}} b,$$

де  $f'_{кол}$  – фокусна відстань об'єктива коліматора;  $f'_{об}$  – фокусна відстань об'єктива, що випробується.

Для безпосереднього знаходження МПФ об'єктива за експериментальними даними необхідно провести коригування на спектр тест-об'єкта. Для забезпечення лінійного переходу від вимірних до розрахункових величин треба забезпечити умову, за якої значення  $f(\nu) = \frac{1}{L(\nu)} = \frac{\pi\nu b}{\sin \pi\nu b}$  не перевищували б 1.05, тобто 5% від величини експериментальних даних. Це коригування проводиться згідно співвідношення:

$$\tilde{S}(\nu') = \tilde{E}(\nu) \times f(\nu),$$

де  $\tilde{S}(\nu')$  – МПФ випробуваного об'єктива;  $\tilde{E}(\nu)$  – МПФ випробуваного об'єктива виміряна безпосередньо при експерименті;  $f(\nu)$  – коригуючий коефіцієнт.

При збільшенні ширини щілинної діафрагми залежність  $f(\nu)$  стає нелінійною, що буде приводити до сильних спотворень отриманих експериментальних даних.

Інструментальна похибка установки ширини щілинної діафрагми дорівнює половині ціни поділки приладу. В подібних установках використовується щілинна діафрагма з мікрометричним механізмом, що

має інструментальну похибку 0,5мкм. Вимірювання проводиться в площині зображення, тому значення  $\Delta b$  також необхідно перевести в площину зображення згідно формули:

$$\Delta b' = \frac{f'_{об}}{f'_{кол}} \Delta b.$$

Тобто абсолютна похибка коригуючого коефіцієнта дорівнює :

$$\begin{aligned} \Delta f(\nu) &= \frac{\pi\nu \sin \pi \nu b - \pi^2 \nu^2 b \cos \pi \nu b}{\sin^2 \pi \nu b} \Delta b' = \\ &= \left( \frac{\pi \nu b}{\sin \pi \nu b} - \frac{\pi^2 \nu^2 b^2}{\sin \pi \nu b} \times \cos \pi \nu b \right) \frac{\Delta b'}{b} = \\ &= (f(\nu) - f^2(\nu) \cos \pi \nu b) \frac{\Delta b'}{b}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Відносна похибка коригуючого коефіцієнта дорівнює:

$$\frac{\Delta f(\nu)}{f(\nu)} = (1 - f(\nu) \cos \pi \nu b) \frac{\Delta b'}{b} = \left(1 - \frac{\pi \nu b}{\sin \pi \nu b}\right) \frac{\Delta b'}{b}. \quad (3.4)$$

Похибка вимірювання ширини щілинної діафрагми вносить додаткову похибку в визначення МПФ досліджуваного об'єктива:

$$\Delta \tilde{S}(\nu'_m) = \tilde{E}(\nu) \times \Delta f(\nu) + \Delta \tilde{E}(\nu) f(\nu) = \tilde{E}(\nu) \Delta f(\nu).$$

В даному випадку ми враховуємо тільки один фактор похибок, тому приймаємо  $\Delta \tilde{E}(\nu) = 0$ . В результаті отримуємо:

$$\frac{\Delta \tilde{S}(\nu'_m)}{\tilde{S}(\nu'_m)} = \frac{\tilde{E}(\nu) \Delta f(\nu)}{\tilde{E}(\nu) f(\nu)} = \frac{\Delta f(\nu)}{f(\nu)}.$$

Підставивши в (3.3) значення ширини щілинної діафрагми  $b' = 1; 2; 3; 0,25$ мкм в діапазоні просторових частот  $\nu = 0 \dots 100$ мм<sup>-1</sup> отримаємо залежності коригуючого коефіцієнта від просторової частоти які показані на рис. 3.4 [21].

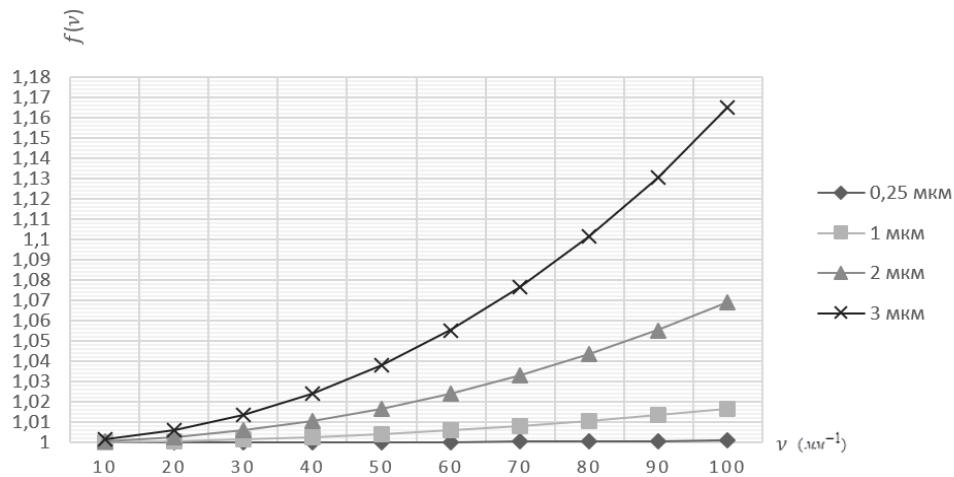


Рис. 3.4. Значення коригуючого коефіцієнта

З графіка видно, що в діапазоні просторових частот  $\nu = 0 \dots 50 \text{ мм}^{-1}$  зберігається нерівність  $f(\nu) \leq 1,05$  при розмірах зображення щілинної діафрагми  $b' = 0,25 \dots 3 \text{ мкм}$ . В діапазоні просторових частот  $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$  ця нерівність виконується тільки при ширині зображення щілинної діафрагми  $b' \leq 2 \text{ мкм}$ . Тому розмір зображення щілинної діафрагми не повинен перевищувати  $1 \dots 2 \text{ мкм}$ . Цей розмір в фокальній площині коліматора може бути збільшений пропорційно співвідношенню  $f'_{\text{кол}}/f'_{\text{об}}$ .

При визначенні впливу похибки установки ширини щілинної діафрагми на точність визначення МПФ враховуємо що вимірювання ми проводимо в площині зображення. Тому значення  $\Delta b' = 0,5 \text{ мкм}$  також необхідно перевести в площину зображення. Якщо, наприклад, досліджується об'єктив з фокусною відстанню  $150 \text{ мм}$ , а фокусна відстань коліматорного об'єктива  $500 \text{ мм}$ , то отримаємо:

$$\Delta b' = \frac{f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}} \Delta b = \frac{150}{500} \cdot 0,5 \text{ мкм} = 0,15 \text{ мкм}$$

Відносна похибка коригуючого коефіцієнта визначається із співвідношення (3.4) і, враховуючи (3.3), вона дорівнює відносній похибці

визначення МПФ досліджуваного об'єктива. Значення відносної похибки для трьох розмірів зображення щілинної діафрагми  $b'=1; 2; 3; 0,25$  мкм в діапазоні просторових частот  $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$  приведені на рис. 3.5 [21].

Ця похибка є нелінійною залежністю від  $\nu$  для прийнятих в дослідженні розмірах щілинної діафрагми. Але внесок цієї похибки в результат вимірювання МПФ досліджуваного об'єктива є величиною 2-го порядку меншини по відношенню до похибки обумовленої шириною щілини.

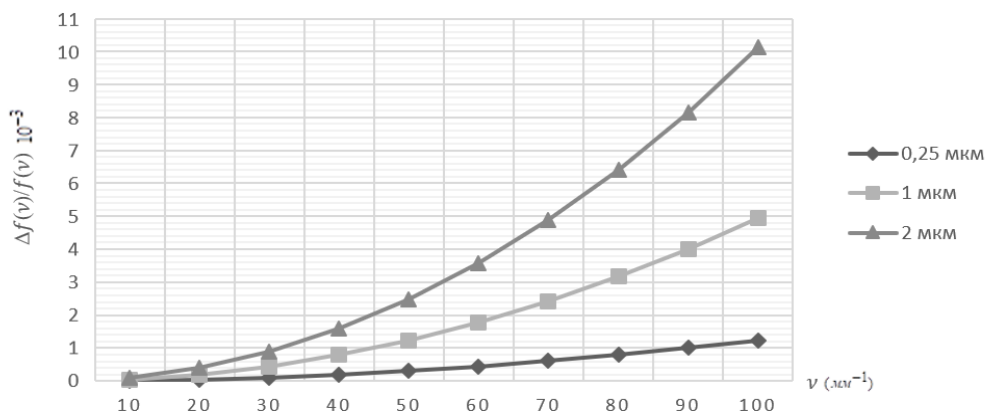


Рис. 3.5. Відносна похибка коригуючого коефіцієнта

Наприклад, при ширині щілини  $b = 1$  мкм на просторовій частоті  $\nu = 100 \text{ мм}^{-1}$  відносна похибка вимірювання МПФ дорівнює:

$$\frac{\Delta f(\nu)}{f(\nu)} = \frac{\Delta \tilde{s}(\nu'_m)}{\tilde{s}(\nu'_m)} (\nu = 100_{\text{мм}^{-1}}) = 4,96 \cdot 10^{-3}.$$

Ширина щілинної діафрагми в стенді вимірювання МПФ об'єктивів повинна враховуватись для визначення МПФ з допустимою похибкою 5%. В залежності від того, який діапазон просторових частот використовується при проведенні досліджень, а також від конструктивних параметрів вимірювальної установки розмір цієї діафрагми може бути визначений з урахуванням розміру її зображення в площині фото

приймального пристрою. Якщо діапазон просторових частот обмежений інтервалом  $\nu = 0 \dots 50 \text{ мм}^{-1}$  зберігається нерівність  $f(\nu) \leq 1,05$  при розмірах зображення щілинної діафрагми  $b_{зобр} = 0,25 \dots 3 \text{ мкм}$ . В діапазоні просторових частот  $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$  ця нерівність виконується тільки при ширині зображення щілинної діафрагми  $b_{зобр} \leq 2 \text{ мкм}$ . Вказані співвідношення не враховують спотворення зображення щілинної діафрагми об'єктивом, який випробується.

## **3.2. Вимоги до фотоприймального вузла установки**

### **3.2.1. Корекція неоднорідності чутливості**

Використання багатоелементних приймачів в установках вимірювання МПФ вимагає врахування неоднорідності чутливості окремих елементів лінійки або матриці і компенсації цього фактора з метою поліпшення якості отриманого зображення тест-об'єкта. Неоднорідність чутливості приймачів обумовлена:

- наявністю пошкоджених пікселів (bad pixels) в приймачі (в якісних приймачах їх кількість становить 0.01%) [23];
- технологічними похибками при виготовленні багатоелементних приймачів (різна геометрія пікселів і відповідно їх площа);
- зміною в часі чутливості окремих пікселів приймачів [24];
- похибками електронної обробки сигналів при зчитуванні.

З метою усунення неоднорідності чутливості проводиться корекція в результаті якої забезпечується отримання однакових вихідних сигналів з кожного пікселя при однаковій вхідній дії на кожен піксель. Сучасні



методи корекції неоднорідності чутливості (Nonuniformity correction (NUC)) матричних приймачів передбачають дві основні групи NUC методів [23-25]:

- методи, які використовують випромінювач з відомою температурою [23];
- методи, що використовують сигнали від сцени, яка спостерігається [25].

Методи корекції, що використовують випромінювач з відомою температурою передбачають лінійну залежність вихідних сигналів пікселів з координатами  $i$  та  $j$  матричного приймача від потоку випромінювання на вході в довільний момент часу  $t$  [24]:

$$Y_{i,j}(t) = a_{i,j}(t) \cdot X_{i,j}(t) + b_{i,j}(t),$$

де  $Y_{i,j}(t)$  – вихідний сигнал;  $X_{i,j}(t)$  – вхідний сигнал;  $a_{i,j}(t)$  – коефіцієнт підсилення або яскравість;  $b_{i,j}(t)$  – коефіцієнт зміщення або контраст.

При випробуванні інфрачервоних матриць в якості випромінювача використовуються абсолютно чорні тіла або заслінки-шторки з рівномірною температурою. Інфрачервоні матричні приймачі в лабораторних умовах встановлюються впритул до абсолютно чорного тіла з відомою температурою [25]. Випромінююча поверхня чорного тіла створює високого ступеня рівномірне випромінювання, яке направляється на матричний приймач. У польових умовах використання чорних тіл для корекції чутливості неможливо або утруднено, в зв'язку з чим використовуються спеціальні конструкції інфрачервоних випромінювачів у вигляді шторок. Зачорнені шторки можуть бути нагрітими до необхідних температур і імітують роботу чорного тіла. В ході випробувань на кожен піксель матричного приймача потрапляє практично рівний потік випромінювання від того чи іншого випромінювача.

Різниця вихідних сигналів пікселів коригується коефіцієнтами підсилення і зсуву згідно схеми на рис. 3.6. При використанні однієї точки (температури) корекції метод називається однокрапковою корекцією. Найбільш часто корекція нерівномірності чутливості інфрачервоних матричних приймачів проводиться по двох точках ( $T_1, T_2$ ), які обмежують діапазон робочих температур (метод двукрапкової корекції). В цьому випадку корекція відбувається за лінійною схемою, а коефіцієнти підсилення і зсуву розраховуються так [25]:

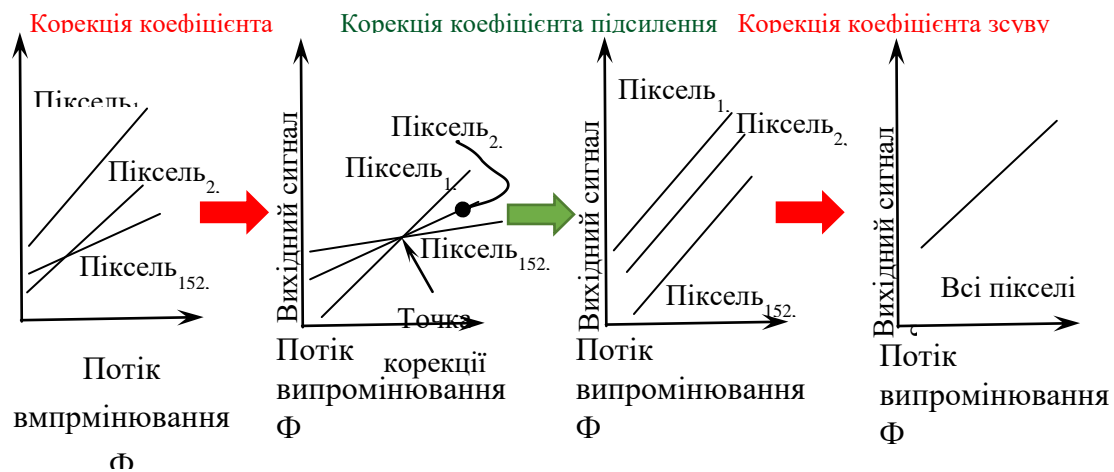


Рис. 3.6. Принцип корекції неоднорідності чутливості і зсуву

$$a_{i,j}(t) = \frac{Y_{i,j}^{T_2}(t) - Y_{i,j}^{T_1}(t)}{X_{i,j}^{T_2}(t) - X_{i,j}^{T_1}(t)} \quad ; \quad b_{i,j}(t) = Y_{i,j}^{T_2}(t) - a_{i,j}(t) \cdot X_{i,j}^{T_2}(t).$$

В результаті вихідний сигнал від пікселів матричного приймача в точках корекції набуває вигляду, наближеного до ідеального вихідного сигналу. В інших точках (при різних температурах) вихідний сигнал відхиляється від ідеального значення вихідного сигналу як показано на рис. 3.7.

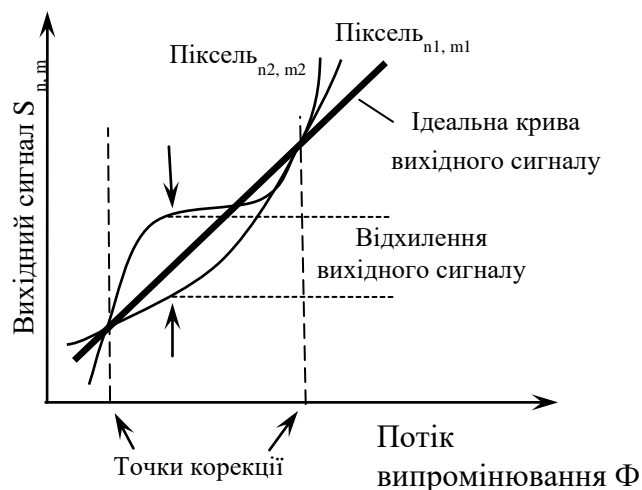


Рис. 3.7. Двоточковий метод корекції

Щоб уникнути цього недоліку застосовують багатоточкові методи [13], де за допомогою збільшення кількості точок корекції покращують відповідність реального і ідеального значення вихідного сигналу.

Методи, які використовують сигнали сцени спостереження, засновані на обробці спеціальними алгоритмами кадру або кадрів сцени, в полі зору матричного приймача. Кадром називається сцена, яка спостерігається за допомогою матричного приймача, при цьому інформація змінюється від кадру до кадру, а неоднорідність чутливості залишається сталою у всіх кадрах і в часі. Серед цих методів можна виділити дві групи: фільтраційні і статистичні [26].

### 3.2.2. Вимоги до точності позиціювання фотоприймального вузла

Вимірювання МПФ треба проводити в фокальній площині об'єктива, який випробується. Внаслідок похибок конструктивних параметрів задній фокальний відрізок об'єктива має відхилення від розрахункового значення в межах 3÷4%. Це приводить до похибки вимірювання МПФ. Тому в

конструкції вимірювального стенда треба передбачити пристрої ручного або автоматичного фокусування фотоприймального пристрою в площину зображення об'єктива. Відповідно виникає питання визначення вимог до пристроїв ручного або автоматичного фокусування фотоприймального пристрою, щоб похибка визначення МПФ не перевищувала 5%. Такий аналіз за допомогою математичного моделювання був проведений в роботах [27,28]. Для досліджень були використані типові схеми інфрачервоних об'єктивів (ІЧ) з різними значеннями фокусних відстаней, діаметрів вхідної зіниці та кутів поля зору. Для прикладу в табл. 3.1 приведені конструктивні параметри однієї з схем об'єктивів [29].

Табл. 3.1

Конструктивні параметри інфрачервоного об'єктива

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	56,4	6,59	Ge
R2	85,0	5,42	
R3	-23,0	3,59	Ge
R4	-26,658	43,32	
R5	23,0	7,15	Ge
R6	27,0	8,19	
R7	$\infty$	1,0	Ge
R8	$\infty$	2,366	

Ці параметри наступні: фокусна відстань  $f' = 36.98\text{мм}$ ; діафрагмене число  $K=1:2,4$ ; поле зору  $2\omega=12^\circ$ ; довжина хвилі  $\lambda = 11\text{мкм}$ [3].

Якщо чутлива площа фотоприймального пристрою зсунута по відношенню до фокальної площини ІЧ об'єктива на величину  $\Delta$  то вимірне значення МПФ відрізняється від розрахункового і визначається із співвідношення [21]:

$$T(R, \Delta) = \frac{4\pi}{a} \cos aR \left\{ \Theta J_1(a) - \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{2n} \sin(2n\Theta) \cdot [J_{2n-1}(a) - J_{2n+1}(a)] \right\} - \frac{4}{\pi a} \sin aR \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \sin[(2n+1)\Theta] \cdot [J_{2n}(a) - J_{2n+2}(a)] \quad (3.5)$$

де  $R = \nu \lambda K$  – просторова частота у відносних одиницях;  $\Delta$  – зсув фото приймального пристрою;  $\nu$  – просторова частота в 1/мм;  $\lambda$  – робоча довжина хвилі об’єктива;  $K = \frac{f'}{D}$  – діафрагмене число;  $a = \frac{\pi R \Delta}{\lambda K^2}$ ,  $\Theta = \arccos R$ ,  $J_n(a)$  – функції Бесселя  $n$ -го порядку.

Співвідношення (3.5) було використано при проведенні математичного моделювання. Для визначення вимог до точності пристроїв ручного або автоматичного фокусування ІЧ об’єктивів в стенді вимірювання МПФ. Моделювання проводилося з використанням програми ZEMAX. Розрахунки відхилень значення МПФ в залежності від  $\Delta$  проводилося на частоті, де ці відхилення були максимальними. Максимально допустимий зсув чутливої площини фотоприймального пристрою відносно фокальної площини об’єктива, що випробувався, визначалося з припущення, що похибка вимірювання МПФ не повинна перевищувати  $\pm 5\%$ . На рис. 3.8 представлені графіки МПФ при положенні фотоприймального пристрою в фокальній площині об’єктива (крива 1) і при можливих зсувах фотоприймального пристрою в бік збільшення цієї відстані на 0.015 мм (крива 2) і її зменшення на 0.020 мм (крива 3).

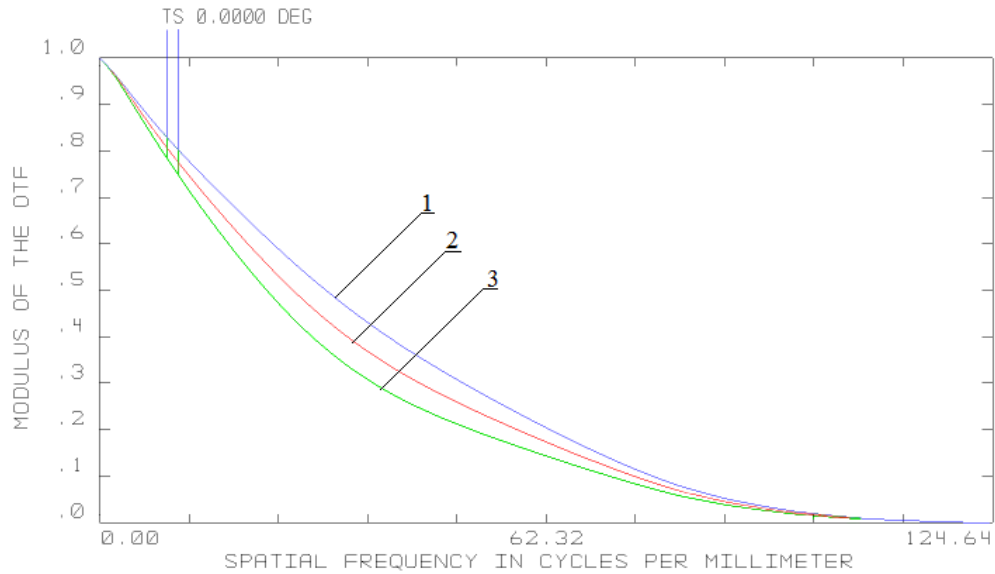


Рис. 3.8. Графік МПФ об'єктива при розфокусуванні

Математичне моделювання показало таке:

- існують певні вимоги до точності позиціонування фотоприймальних пристроїв в установці для вимірювання МПФ, що обумовлюють похибку вимірювання в межах 5%;
- вимоги до похибки пристроїв позиціонування в разі збільшення фокального відрізка об'єктива жорсткіші і знаходяться в межах 15 мкм;
- вимоги до похибки пристроїв позиціонування в разі зменшення фокального відрізка об'єктива знаходяться в межах 20 мкм;
- загалом похибка пристроїв позиціонування фотоприймального пристрою для забезпечення похибки вимірювання МПФ в межах 5% повинна не перебільшувати 15 мкм.

## ВИСНОВКИ

В зв'язку з бурхливим розвитком фотоніки перед науковцями, конструкторами, виробничниками постає задача контролю якості зображення об'єктивів, що працюють в широкому спектральному діапазоні 0,4÷14 мкм. В залежності від призначення вимоги до якості зображення можуть бути більше або менше жорсткими, а від цього залежить вартість об'єктива. Це потребує розробки установок контролю якості зображення об'єктивів з урахуванням можливостей сучасної елементної бази. Основними характеристиками для оцінки якості зображення міжнародна система стандартизації ISO визначила оптичну передавальну функцію і її складові модуляційну передавальну функцію і фазову передавальну функцію. При серійному виготовленні об'єктивів доцільно користуватися числовими критеріями, що отримуються з визначених характеристик. До таких критеріїв в першу чергу відносяться коло розсіювання, число Штреля, роздільна здатність на певній просторовій частоті (найчастіше на частоті Найквіста) та максимальна роздільна здатність.

В монографії розглянуті різні схеми установок для контролю якості зображення об'єктивів. Використання тієї чи іншої схеми пов'язано з спектральним діапазоном роботи об'єктива, можливостями виробника, стадією виготовлення об'єктива. Наприклад, на етапі складання і юстування об'єктива потрібно здійснювати контроль в реальному масштабі часу, а при його паспортизації така вимога не є критичною. Суттєвим фактором є елементна база, яка може бути використана при проектуванні і вона постійно вдосконалюється. В будь якому випадку постає питання узгодження розрахункових характеристик якості зображення об'єктива з характеристиками установки і, в першу чергу, параметрами фотоприймального пристрою, який перетворює оптичний сигнал в

електричний з метою подальшої його цифрової обробки.

У видимому спектральному діапазоні це узгодження доцільно проводити при використанні проєкційних мікрооб'єктивів, які виготовляють з мінімальними абераціями. Вони не спотворюють зображення і проєктують з необхідним збільшенням проміжне зображення тест-об'єкта в чутливу площину фотоприймача. В монографії запропоновано метод визначення збільшення проєкційного мікрооб'єктива в залежності від кола розсіювання об'єктива який випробується і розмірів пікселя багатоелементного фотоприймача.

В інфрачервоному діапазоні виготовлення мікрооб'єктивів потрібного збільшення і необхідної якості зображення часто є неможливим, оскільки номенклатура існуючих матеріалів обмежена. Тому в монографії запропоновано два методи покращення роздільної здатності установок. Перший метод полягає в зміні взаємної орієнтації зображення тест-об'єкта в чутливій площині фотоприймача і розташування його рядку для лінійного приймача з переносом заряду або стовпчика для матричного фотоприймача. Завдяки цьому вдається збільшити кількість пікселів, які приймають участь в аналізі розподілу опроміненості в функції розсіювання.

Другий метод використовує мікросканування матричним або лінійним фотоприймачем зображення функції розсіювання в поперечному напрямку. Завдяки проведеному математичному моделюванню вирішено питання визначення необхідної кількості кроків мікросканування для подальшого проведення Фур'є-перетворення при обчисленні модуляційної передавальної функції з необхідною точністю.

Важливим питанням при проєктуванні установок контролю якості зображення об'єктивів є оцінка їх можливих похибок. Аналіз показав, що джерелами похибок можуть бути: похибки освітлювального пристрою,



похибки коліматорного об'єктива, похибки пов'язані з кінцевою шириною щілинного тест-об'єкта, похибки при розфокуванні системи внаслідок неминучого відхилення фокусної відстані об'єктива який випробується в межах декількох відсотків. Це відхилення обумовлене технологічними факторами при виготовленні і складанні об'єктивів.

В монографії розглянуті вимоги до цих пристроїв і елементів, які дозволяють проводити вимірювання модуляційної передавальної функції з похибкою в межах 5%. Проведене математичне моделювання показало, наприклад, що розмір зображення тест-об'єкта без врахування спотворення цього зображення об'єктивом повинен знаходитись в межах 2÷3 мкм. При збільшенні цього розміру значення коригуючого коефіцієнта починає нелінійно зростати і систематична похибка вимірювання модуляційної передавальної функції перевищує 5%.

Важливим фактором є потреба компенсації розфокування фотоприймального пристрою установки внаслідок відхилення фокусної відстані об'єктива від розрахункового значення обумовленого технологією виготовлення і складання. Для компенсації розфокування в установках треба передбачити механічні пристрої ручного або автоматичного фокусування фотоприймального пристрою в фокальну площину об'єктива який випробується. Математичне моделювання з використанням типових схем інфрачервоних об'єктивів показало, що для забезпечення похибки вимірювання модуляційної передавальної функції в межах 5% слід пред'явити вимоги до похибки пристроїв позиціонування в межах 15 мкм.

## Перелік посилань

1. А.с. СССР № 1739240. Устройство для контроля качества объективов/ Кучеренко О.К., Колобродов В.Г., Абрахам А., Вензель Д. Оpubл.1992, Бюл. №21.
2. Патент на корисну модель України № 33371. Пристрій для контролю якості об'єктива / Кучеренко О.К., Вдовиченко С.В.// МПК G01M 11/02. – Заявл. 26.12.2007; Оpubл. 26.06.2008; Бюл. №12.
3. Патент на корисну модель України № 40864. Пристрій для контролю якості об'єктива / Кучеренко О.К.; Вдовиченко С.В.// МПК G01M 11/02. – Заявл. 04.12.2008; Оpubл. 27.04.2009; Бюл. №8.
4. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А.Окатова. – СПб, Политехника, 2004. – 679 с.
5. Вычислительная оптика / Справ. под ред. М.М. Русинова.–Л.: Машиностроение, 1984. – 424 с.
6. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. Теория, основы проектирования, оптические характеристики. – М.: Искусство, 1978. – 543 с.
7. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
8. Кучеренко О.К. Юстування та випробування оптичних систем. Конспект лекцій. – К.: ВПЦ НТУУ «КПІ ім.Ігоря Сікорського», 2000. – 167 с.
9. Кирилловский В.К. Методы исследования и контроля качества оптических систем. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 125 с.
10. Матричные фотоприемники в цифровых голографии и голографической интерферометрии. /Г.И.Грейсух, Е.Г.Ежов, С.В.Казин, С.А. Степанов// Мир Голографии. 2017. Том 3. №1. С. 39–42.

11. Кучеренко О.К. Принципи проектування стендів для вимірювання ОПФ фокусуєчих вузлів оптотехніки. Елементна база радіоелектронних пристроїв. – Харків. 2008. С.52–55.
12. Кучеренко О.К. Аппаратура для контроля качества объективов прицелов стрелкового оружия// Артиллерийское и стрелковое вооружение. 2009. №1. С.21–24.
13. Вимірювально-обчислювальний комплекс для контролю якості об'єктивів / О.К.Кучеренко., І.В.Кравченко, М.І.Лихоліт,[та ін.] // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія придобування. 2003. №23. С. 38–45.
14. Кучеренко О.К., Колобродов В.Г. Установка для оценки качества оптических систем // Приборы и техника эксперимента. 1990. №6. С.203–204.
15. Кучеренко О.К. , Савекін О.В. Визначення параметрів вузла фотометрування в стенді вимірювання оптичної передавальної функції об'єктивів // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія придобування. 2003. № 26. С. 5–11.
16. Великотный М.А.,Петрас С.В. Принципиальные аспекты измерения ОПФ с помощью дискретного самосканирующего фотоприемника// Оптический журнал. 1994. № 9. С. 50 – 55.
17. Патент Российской Федерации №2024000. Устройство для контроля качества оптической системы / О.К. Кучеренко, А.А. Зарицкий, В.Г. Колобродов, Л.А. Коваленко// МПК G01M 11/02. Опубл1994. Бюл. №22.
18. Кучеренко О. К., Медведь И.А. Контроль качества сборки и юстировки объективов тепловизионных систем. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2012. № 1. С.26 –30.
19. Колобродов В.Г., Явдоцак О.М. Метод вимірювання модуляційної передавальної функції камери з матричним приймачем випромінювання //

- Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2015. №1. С. 58–61.
20. Кучеренко О.К., Кучеров І.В. Точність визначення МПФ фотоприймальним пристроєм з багатоелементним фотоприймачем// Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. 2006. №31. С. 31–38.
21. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1990. – 224с.
22. Кучеренко О.К., Киричук Б.В. Визначення параметрів щілинної діафрагми в стенді для вимірювання оптичної передавальної функції об’єктива// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2019. №2. С. 51–55.
23. Vollmer M., Möllmann K. Infrared Thermal Imaging\_ Fundamentals, Research and Applications – Weinheim, Germany, 2014. – 611 с.
24. Mudau A., Willers C., Griffith D., Roux F., Non-uniformity correction and bad pixel replacement on lwir and mwir images . – Conference (SIECPC), 2011.– 443 с.
25. Сергунов А. А. Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных фотоприемников // Известия вузов. Серия приборостроение. 2009. № 8. С. 38–42.
26. Кучеренко О.К., Опич А.В. Методы коррекции неоднородности чувствительности инфракрасных матричных приемников// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2017. №4. С 192–197.
27. Кучеренко О.К., Медведь И.А. Определение требований к точности позиционирования объективов в стенде измерения МПФ // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2012. № 2. – С. 111–115.

28. Кучеренко О.К., Кірічук Б.В. Визначення вимог до позиціювання інфрачервоних об'єктів при вимірюванні модуляційної передавальної функції // Вісник Хмельницького національного університету, серія «Технічні науки». 2019. № 6. – С. 207–211.
29. Патент на корисну модель України № 201606546. Інфрачервоний світлосильний трилінзовий об'єктив / Банделюк О.В., Гусєв А.Ю., Колобродов В.Г. // МПК G02В.– 2017. Бюл. № 10.