

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЩІЛИННОЇ ДІАФРАГМИ В СТЕНДІ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ОБ'ЄКТИВІВ

Мета статті – оцінка впливу ширини щілинної діафрагми в стенді визначення оптичної передавальної функції об'єктивів і похибки вимірювання цієї ширини на точність вимірювань. На основі теоретичних досліджень визначені значення коригуючого коефіцієнта для зменшення впливу вказаних факторів. Розрахунки проведені з використанням отриманих теоретичних співвідношень дозволили знайти допустимі значення ширини діафрагми, при якій похибка вимірювань не перевищує 5%.

Ключові слова: оптична передавальна функція, щілинна діафрагма, точність вимірювання.

KUCHERENKO O., KYRYCHUK B.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DETERMINATION OF TENSION DIAGRAM PARAMETERS IN THE STAND FOR MEASUREMENT OF OPTICAL TRANSMISSION LENS FUNCTION

The purpose of the article is to evaluate the effect of the aperture width in the stand of determining the optical transfer function of the lenses and the measurement error of this width on the measurement accuracy. The aperture is used as a test object when measuring the line scattering function that characterizes the quality of the lens image. The microprocessor, performing the Fourier transform of the line scattering function, determines the optical transfer function and its components: the modulation transfer function and the phase transfer function. During the design of the optical transfer function stand, there is a need for energy considerations to increase the width of the slit aperture, which results in the spatial spectrum of the test object beginning to affect the measurement results of the optical transfer function of the lens. In addition, the effect of the measurement of the slit width measurement on the result of determining the optical transfer function must be evaluated. In the article, based on theoretical studies, the values of the correction coefficient are determined to reduce the influence of these factors. The calculations made using the obtained theoretical ratios made it possible to find acceptable values of the width of the slit diaphragm, in which the measurement error does not exceed 5%.

Keywords: optical transfer function, slit diaphragm, measurement accuracy.

Вступ. Одним з методів визначення оптичної передавальної функції (ОПФ) об'єктивів є вимірювання функції розсіювання лінії (ФРЛ) як імпульсного відгуку оптичної системи з подальшим використанням швидкого перетворення Фур'є для розрахунку модуля ОПФ – модуляційної передавальної функції (МПФ) та аргументу ОПФ – функції передачі фази (ФПФ). Під час вимірювань вузол фотометрування визначає значення освітленості в площині зображення тест-об'єкту, яким є щілинної діафрагма, в залежності від лінійної координати. Результат вимірювання визначається не тільки якістю об'єктиву що випробується, але і параметрами щілинної діафрагми. Фактично це є добутком двох МПФ: досліджуваного об'єктива і діафрагми. Тобто експериментальні значення МПФ об'єктива будуть визначені з певною похибкою, що залежить від діафрагми. Допустима похибка подібних вимірювань може бути в межах 5%. У зв'язку з цим постає питання визначення ширини щілинної діафрагми і похибки її вимірювання, при яких точність визначення МПФ буде задовольняти вказаним вимогам.

Ціллю роботи є визначення впливу параметрів щілинної діафрагми на точність вимірювання МПФ в стенді оцінки якості об'єктивів. При цьому необхідно вирішити наступні питання:

- оцінити вплив ширини щілинної діафрагми на точність вимірювання МПФ;
- оцінити вплив похибки визначення цієї ширини на точність вимірювання МПФ;
- знайти значення коригуючого коефіцієнта для підвищення точності вимірювання МПФ;
- визначити розміри щілинної діафрагми, при яких похибка вимірювання МПФ не перевищуватиме 5%.

Основні теоретичні положення. Розробка стендів для визначення ОПФ об'єктивів є актуальною задачею, оскільки ОПФ найбільш інформативно і повно характеризує якість об'єктивів. Методиці проектування таких стендів присвячено ряд публікацій [1],[2],[3]. Математично ОПФ є Фур'є-перетворенням від функції розсіювання крапки або лінії. При вимірюванні ФРЛ за допомогою лінійного приладу з переносом заряду (ЛППЗ) використовується дискретне Фур'є-перетворення згідно співвідношення [2]:

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

де T - період дискретизації значень ФРЛ; $S_{x'k}$ - нормовані 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; ν' - просторова частота в площині зображення.

З урахуванням (1) та формули Ейлера МПФ, як модуль ОПФ дорівнює:

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

Якщо в якості тест-об'єкта використовується щілинної діафрагма з розподілом яскравості в залежності від поперечної координати $L(x)$, то спектр цієї функції з урахуванням перетворення Фур'є має наступний вигляд:

$$\tilde{L}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-j2\pi\nu x} dx. \quad (3)$$

Теоретично закон розподілу яскравості може бути представлений наступним співвідношенням:

$$L(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

В цьому випадку функція $L(x)$ має назву дельта-функції і, враховуючи можливість розкладання $e^{-j2\pi\nu x}$ з використанням формули Ейлера, можна дійти висновку, що модуль оптичної передавальної функції міститиме косинус-гармоніки $\cos(2\pi\nu x)$, значення яких при $x=0$ дорівнюють одиниці для усіх просторових частот. Тобто спектр цієї функції містить усі гармоніки з амплітудами, що дорівнюють одиниці, а фазова характеристика такого сигналу дорівнює нулю для усіх просторових частот, що й показано на рис. 1.

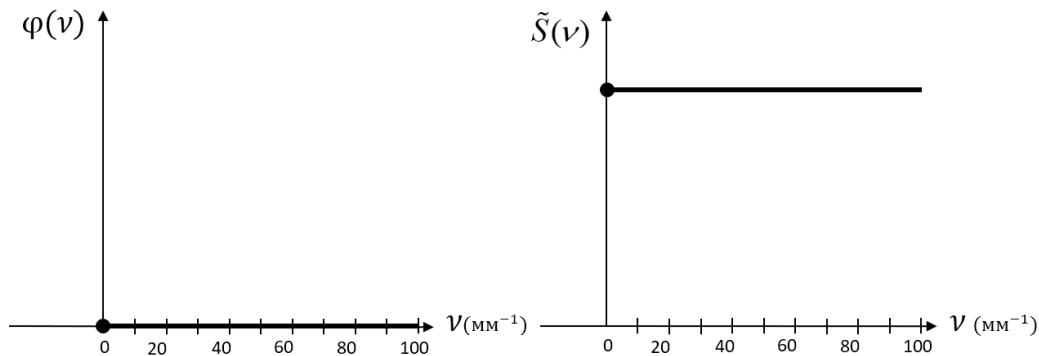


Рис. 1. Спектральні характеристики дельта функції

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:

$$L(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-j2\pi\nu x} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{b} e^{-j2\pi\nu x} dx = \frac{1}{b} \frac{e^{-j2\pi\nu b} - e^{j2\pi\nu b}}{-j2\pi\nu} = \frac{\sin(\pi\nu b)}{\pi\nu b}, \quad (5)$$

де b - ширина щілинної діафрагми в площині коліматора.

В площині фотоприймача ширина зображення щілинної діафрагми дорівнює:

$$b' = \frac{f'_{об}}{f'_{кол}} b, \quad (6)$$

де $f'_{кол}$ - фокусна відстань об'єктива коліматора; $f'_{об}$ - фокусна відстань досліджуваного об'єктива.

Для безпосереднього знаходження МПФ за експериментальними даними необхідно провести

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

$$\tilde{S}(\nu') = \tilde{E}(\nu) \times f(\nu), \quad (7)$$

де $\tilde{S}(\nu')$ – МПФ випробуваного об'єкта; $\tilde{E}(\nu)$ – МПФ випробуваного об'єкта 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 Δb приймається рівною половині ціни поділки приладу. В подібних стендах використовується щілинна діафрагма з мікрометричним механізмом, що має інструментальну похибку 0,5 мкм. Вимірювання ми проводимо в площині зображення, тому значення Δb також необхідно перевести в площину зображення згідно формули:

$$\Delta b' = \frac{f'_{об}}{f'_{кол}} \Delta b. \quad (8)$$

Таким чином абсолютна похибка коригуючого коефіцієнта враховуючи (5) дорівнює :

$$\Delta f(\nu) = \frac{\pi \nu \sin \pi \nu b - \pi^2 \nu^2 b \cos \pi \nu b}{\sin^2 \pi \nu b} \Delta b' = \left(\frac{\pi \nu b}{\sin \pi \nu b} - \frac{\pi^2 \nu^2 b^2}{\sin \pi \nu b} \times \cos \pi \nu b \right) \frac{\Delta b'}{b} = (f(\nu) - f^2(\nu) \cos \pi \nu b) \frac{\Delta b'}{b}. \quad (9)$$

Відносна похибка коригуючого коефіцієнта дорівнює:

$$\frac{\Delta f(\nu)}{f(\nu)} = (1 - f(\nu) \cos \pi \nu b) \frac{\Delta b'}{b} = \left(1 - \frac{\pi \nu b}{\sin \pi \nu b} \right) \frac{\Delta b'}{b}. \quad (10)$$

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

$$\Delta \tilde{S}(\nu'_m) = \tilde{E}(\nu) \times \Delta f(\nu) + \Delta \tilde{E}(\nu) f(\nu) = \tilde{E}(\nu) \Delta f(\nu). \quad (11)$$

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

$$\frac{\Delta \tilde{S}(\nu'_m)}{\tilde{S}(\nu'_m)} = \frac{\tilde{E}(\nu) \Delta f(\nu)}{\tilde{E}(\nu) f(\nu)} = \frac{\Delta f(\nu)}{f(\nu)}. \quad (12)$$

Проведені розрахунки і їх аналіз. Підставивши в (5) значення ширини щілинної діафрагми $b' = 1; 2; 3; 0,25$ мкм в діапазоні просторових частот $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$ отримаємо залежності коригуючого коефіцієнта від просторової частоти, що показано на рис.2.

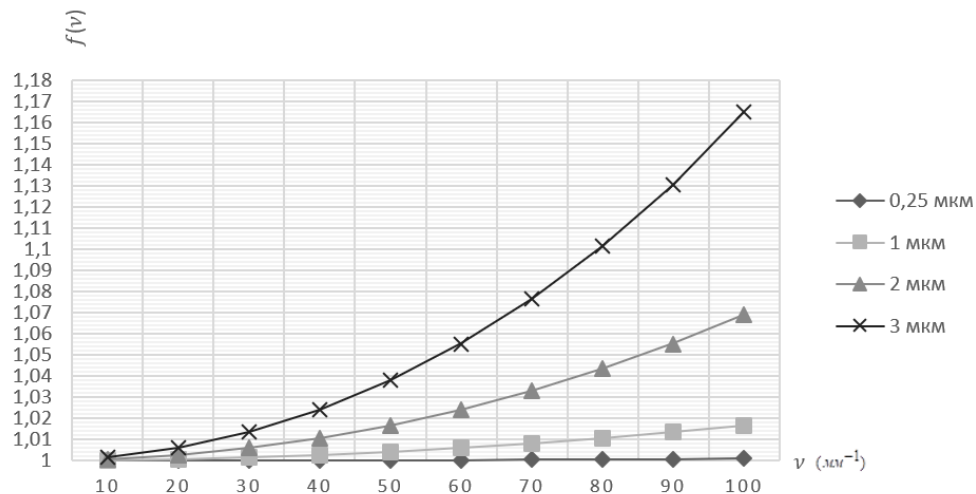


Рис. 2. Значення коригуючого коефіцієнта

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

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

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

Відносна похибка коригуючого коефіцієнта визначається із співвідношення (10) і, враховуючи (12), вона дорівнює відносній похибці визначення МПФ досліджуваного об'єктива. Значення відносної похибки для трьох розмірів зображення щілинної діафрагми $b' = 1; 2; 3; 0,25 \text{ мкм}$ в діапазоні просторових частот $\nu = 0...100 \text{ мм}^{-1}$ приведені на рис.3.

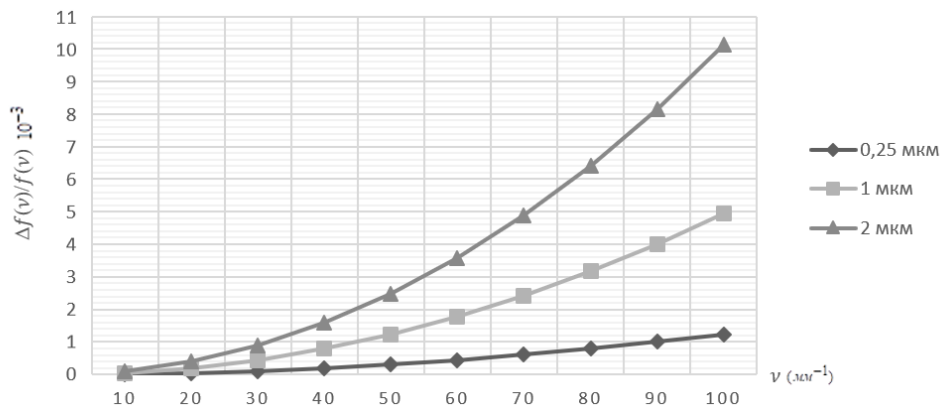


Рис. 3. Відносна похибка коригуючого коефіцієнта

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

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

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

Висновки. Ширина щілинної діафрагми в стенді вимірювання МПФ об'єктів 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 вимірювального стенда розмір цієї діафрагми може бути визначений з урахуванням розміру її зображення в площині фото приймального пристрою. Якщо діапазон просторових частот обмежений інтервалом $\nu = 0...50 \text{ мм}^{-1}$ зберігається нерівність $f(\nu) \leq 1,05$ при розмірах зображення щілинної діафрагми $b_{зобр} = 0,25...3 \text{ мкм}$. В діапазоні просторових частот $\nu = 0...100 \text{ мм}^{-1}$ ця нерівність виконується тільки при ширині зображення щілинної діафрагми $b_{зобр} \leq 2 \text{ мкм}$.

Для визначення абсолютної похибки вимірювання МПФ об'єктива в наслідок похибки вимірювання ширини щілинної діафрагми треба значення МПФ об'єктива, які відповідають певним просторовим частотам множити на відповідні значення відносної похибки коригуючого коефіцієнта. Ця похибка є нелінійною залежністю від ν для прийнятих в дослідженні розмірах щілинної діафрагми. Але вклад цієї похибки в результат вимірювання МПФ досліджуваного об'єктива є величиною 2-го порядку меншини по відношенню до похибки обумовленої шириною щілини.

Література

1. Пат. 33371 А Україна, МПК G01M 11/02. Пристрій для контролю якості об'єктива / О.К.Кучеренко. М.С.Вдовіченко. - № ; Заявл. 26.12.2007; Опубл. 26.06.2008; Бюл. - №12. - 4с.
2. Кучеренко О.К., Савекін А.В. Визначення параметрів вузла фотометрування в стенді вимірювання ОПФ об'єктивів//Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування. – 2003. - №26. – С. 5 – 11.
3. Кучеренко О.К., Кучеров Є.В. Точність визначення МПФ об'єктивів фотоприймальним пристроєм з ЛППЗ//Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування. – 2006. - №31. – С. 31 – 38.

References

1. Pat. 33371 A Ukrayina, MPK G01M 11/02. Prystrij dlja kontrolju jakosti ob'jektyva / O.K.Kucherenko. M.S.Vdovichenko. - # ; Zayavl. 26.12.2007; Opubl. 26.06.2008; Bjul. - #12. - 4s.
2. Kucherenko O.K., Savekin A.V. Vyznachennja parametriv vuzla fotometruvannja v stendi vymirjuvannja OPF ob'jektyviv//Visnyk NTUU «KPI». Prylodobuuvannja. – 2003. - #26. – S. 5 – 11.
3. Kucherenko O.K., Kucheroev Je.V. Tochnistj vyznachennja MPF ob'jektyviv fotopryjmalnym prystrojem z LPPZ//Visnyk NTUU «KPI». Prylodobuuvannja. – 2006. - #31. – S. 31 – 38.

Рецензія/Peer review : 06.11.2019

Надрукована/Printed : 02.01.2020