УДК 771.317

В. А. ЄДЕМСЬКИЙ, Г. Г. ЛЕБІДЬ, Д. А. НАЗАРОВ

ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНВЕРСОРНИХ МЕХАНІЗМІВ РЕПРОДУКЦІЙНИХ АПАРАТІВ

Характерною особливістю більшості великоформатних репродукційних фотоапаратів, що застосовуються у поліграфічній промисловості, є наявність інверсорних механізмів, які забезпечують автоматичну наводку на різкість при зміні масштабу шляхом переміщення оригіналотримача, касети і об'єктива на задані для кожного масштабу віддалі, що визначаються рівнянням об'єктива:

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f}, \tag{1}$$

де x — віддаль від оригіналу до передньої головної площини об'єктива; y — віддаль від фотошару до задньої головної площини об'єктива; f — фокусна віддаль об'єктива.

Оскільки інверсорні механізми, які є, по суті, найпростішими лічильними приладами, відтворюють залежність (1) з певними похибками, становить інтерес розглянути питання про допустиму величину цієї похибки, виходячи із специфічних вимог до репродукційних фотоапаратів як до оптичних систем, призначених для одержання високоякісних зображень в заданому діапазоні змін масштабу зйомки.

Питання, пов'язані із забезпеченням різкості зображення, розглянуті досить детально [1, 2], проте ці дослідження у відповідності зі специфікою звичайних видів зйомок ставлять перед собою в основному наступну мету — визначення глибини різко зображуваного простору при заданих параметрах оптичної системи і масштабі зйомки. При проектуванні ж репродукційних фотоапаратів та їх інверсорних механізмів завдання формулюється дещо по-іншому — визначення допустимих похибок установки оригіналу і фотошару (тобто допусків на віддалі x і y), при яких різкість фотографічних зображень задовольняє поставлені вимоги.

В роботі [3] розглядаються окремі випадки цієї задачі — визначення допуску на віддаль x при правильній установці фотошару і визначення допуску на віддаль y при правильній установці оригіналу.

В цій статті розглядається загальний випадок даної задачі, який становить найбільший практичний інтерес, оскільки в реальних системах репродукційних фотоапаратів неминучі похибки установки як оригіналу, так і фотошару.

З рівняння (1) ясно, що кожній площині (наприклад B) предметного простору відповідає одна спряжена з нею площина B' простору зображень (див. рис. 1). Випадок, коли даний об'єкт розміщений в площині B, а фотошар в площині B', є ідеальним випадком зйомки при відсутності похибок установки оригіналу і фотошару. Різкість одержуваного в площині B' зображення визначається в цьому випадку тільки роздільною здатністю об'єктива.

Площини B і B' можна назвати розрахунковими площинами різкого зображення для деякого масштабу зйомки, що визначається співвідношенням:

$$M = \frac{y}{x}\,. \tag{2}$$

Якщо фотографований об'єкт зміщений відносно розрахункової площини B на віддаль Δx і розміщується в площині A, то площина різкого зображення в просторі зображень переміститься відносно площини B' на деяку віддаль a (площина A').

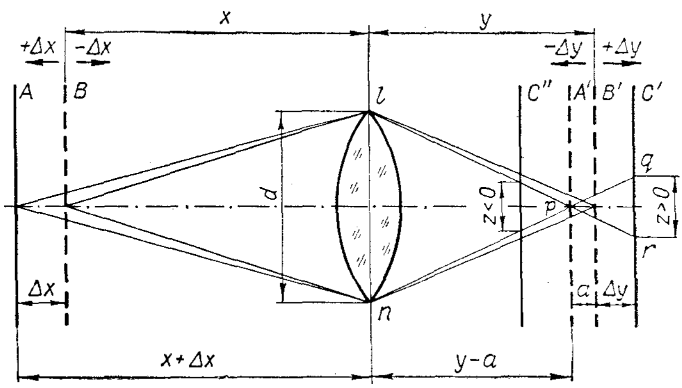

Рис. 1. Схема побудови оптичного зображення при наявності похибок установки оригіналу і фотошару.

В загальному випадку фотошар також зміщений відносно розрахункової площини B' на деяку віддаль Δy (площини C' або C''). При цьому в площині фотошару спостерігається розфокусування зображення, що оцінюється діаметром кружка розсіяння z.

Для оцінки допустимих похибок установки оригіналу і фотошару визначимо, як залежить діаметр кружка розсіяння z від параметрів оптичної системи f і k (k — знаменник відносного отвору), масштабу зйомки M і похибок установки оригіналу Δx та фотошару Δy.

На основі рівняння (1) можна записати:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{x+\Delta x} + \frac{1}{y-a} = \frac{1}{f}\,. \tag{3}$$

Звідси

$$a = \frac{\Delta x\, y^2}{x^2 + \Delta x\,(x+y)}\,.$$

З подібності трикутників lnp і pqr випливає:

$$\frac{y-a}{d} = \frac{\Delta y + a}{z}\,; \tag{4}$$

або

$$a = \frac{yz - \Delta y \cdot d}{z+d}\,.$$

Прирівнюючи праві частини виразів (3) і (4) і розв'язуючи одержане рівняння відносно Δy, одержуємо:

$$\Delta y = \frac{zkf\,(1+M) + \Delta x M\,(zk - fM)}{\Delta x\, M + f}\,. \tag{5}$$

Тут враховано, що $d = \frac{f}{k}$, $y = Mx$.

Рівняння (5) являє собою досить складну дробово-лінійну функцію відносно змінної Δx. Але для практичних цілей можна використати спрощений вираз, який одержимо при розкладанні функції, визначеної виразом (5), в ряд Маклорена по степенях Δx

$$\Delta y = f(\Delta x) = f(0) + \frac{1}{1!} \Delta x f'(0) + \frac{1}{2!} \Delta x^2 f''(0) + \cdots$$

Оскільки величини Δx і Δy малі за абсолютною величиною, два перші члени ряду вже забезпечують достатню для практичних цілей точність.

Тому що

$$f(o) = zk(1+M),$$

$$f'(0) = -\frac{M^2}{f}(f + zk),$$

то спрощена залежність $\Delta y = f(\Delta x)$ буде мати такий вигляд:

$$\Delta y = -\frac{M_2}{f}(f + zk)\Delta x + zk(1+M). \tag{6}$$

Розв'язавши рівняння (6) відносно z, одержимо шукану залежність $z = f(k, f, M, \Delta x, \Delta y)$;

$$z = \frac{f(\Delta x M^2 + \Delta y)}{k[f(1+M) - \Delta x M^2]}. \tag{7}$$

Вираз (7) дійсний для будь-яких випадків взаємного розташування площин A, B і B', C' (з врахуванням знаків величин Δx, Δy та z). У відповідності з загальноприйнятими положеннями геометричної оптики, зміщення площин, в яких знаходяться оригінал і фотоплівка, в напрямках віддалення від об'єктива буде відповідати додатним значенням Δx і Δy; зміщення цих площин в протилежну сторону (до об'єктива) буде відповідати від'ємним значенням Δx і Δy (рис. 1).

Хоч діаметр кружка розсіяння z є сугубо додатною величиною формально відповідно до виразу (7), z може приймати як додатне (при $\Delta x > 0$; $\Delta x M^2 > \Delta y$), так і від'ємне (при $\Delta x < 0$; $\Delta x M^2 > \Delta y$) значення. Це говорить про те, що при переміщенні площини розташування фотошару відносно площини різкого зображення (наприклад, з положення C' в C'') діаметр кружка розсіяння z, монотонно зменшуючись в міру наближення до площини різкого зображення, після переходу через цю площину знову починає зростати за абсолютною величиною, що можна формально інтерпретувати як переміну знака z після проходження через нульове значення.

Як видно з рис. 1 і виразу (7), $z > 0$ в тому випадку, коли точка збігання променів p лежить перед площиною розміщення фотошару (площина C'); в протилежному випадку $z < 0$ (площина C'').

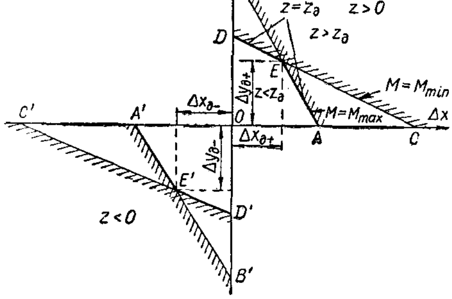

Рис. 2. Графіки залежностей $\Delta y = f(\Delta x)$ при різних значеннях масштабу зйомки.

З рівняння (7) випливає, що величина кружка розсіяння при деяких значеннях Δx і Δy буде найбільшою, якщо вони будуть одного знаку, тобто коли $\Delta x > 0$ і $\Delta y > 0$ (при цьому $z > 0$) або коли $\Delta x < 0$ і $\Delta y < 0$ (при цьому $z < 0$). Це відповідає найбільш несприятливій комбінації похибок, при якій слід визначати їх допустимі значення.

При визначенні допусків на віддалі Δx і Δy треба враховувати, що згідно з рівнянням (6) різним масштабам зйомки M відповідає різний розподіл Δx і Δy. На рис. 2 зображені графіки залежностей $\Delta y = f(\Delta x)$ для деяких граничних масштабів зйомки M_{max} і M_{min} і заданого значення діаметра кружка розсіяння z_∂ (в першому квадраті зображений випадок, коли $z>0$; в третьому — коли $z<0$). Як видно з рис. 2, прямі AB і $A'B'$, що відповідають $M=M_{max}$, обмежують трикутні області OAB і $OA'B'$, де знаходяться всі значення Δx і Δy, при яких діаметр кружка розсіяння не перевищує допустимого, тобто $|z| \leqslant z_\partial$. Аналогічно, прямі CD і $C'D'$ обмежують область допустимих значень Δx і Δy для випадку $M=M_{min}$. Очевидно, що координати точок перетину цих прямих (точки E і E') визначають ті максимально допустимі значення Δx_∂ і Δy_∂, при яких $|z| \leqslant z_\partial$ в заданому діапазоні зміни масштабів зйомки.

Координати точок E і E' можна визначити, розв'язавши систему рівнянь:

$$\Delta y_\partial = -\frac{M^2_{max}}{f}(f + z_\partial k)\,\Delta x_\partial + z_\partial k(1 + M_{max}); \tag{8}$$

$$\Delta y_\partial = -\frac{M^2_{min}}{f}(f + z_\partial k)\cdot\Delta x_\partial + z_\partial k(1 + M_{min}), \tag{9}$$

перше з яких є рівнянням прямих AB (при $z_\partial>0$) і $A'B'$ (при $z<0$), друге — прямих CD (при $z_\partial>0$) і $C'D'$ (при $z_\partial<0$). В результаті розв'язку одержуємо:

$$\Delta x_\partial = \frac{z_\partial kf}{(M_{max} - M_{min})(f + z_\partial k)}; \tag{10}$$

$$\Delta y_\partial = z_\partial k\frac{M_{max} + M_{max}M_{min} + M_{min}}{M_{max} + M_{min}}. \tag{11}$$

Оскільки в рівняннях (10) і (11) z_∂ може приймати як додатнє, так і від'ємне значення, допустимі відхилення Δx_∂ і Δy_∂ також можуть бути як додатними, так і від'ємними, створюючи двостороннє поле допуску.

З рівняння (12) випливає, що додатному допускові Δx (позначимо його Δx_∂) відповідає додатне значення z_∂. Тоді

$$\Delta x_\partial + = \frac{z_\partial kf}{(M_{max} + M_{min})(f + z_\partial k)}. \tag{12}$$

Від'ємне значення допуску Δx_∂— буде при $z_\partial<0$. Абсолютне значення Δx_∂ буде дорівнювати

$$\Delta x_\partial - = \frac{z_\partial kf}{(M_{max} + M_{min})(f - z_\partial k)}. \tag{13}$$

З рівнянь (12) і (13) випливає, що допуск на віддаль x розподіляється несиметрично: допустимі відхилення оригіналу від розрахункової площини в напрямку до об'єктиву ($\Delta x_\partial -$) завжди будуть дещо більші, ніж в напрямку від об'єктиву ($\Delta x_\partial +$), оскільки $\Delta x_\partial - > \Delta x_\partial +$. Проте для довгофокусних репродукційних об'єктів ця різниця настільки незначна, що при практичних розрахунках нею можна знехтувати. Дійсно, якщо $f \gg z_\partial k$, то

$$\Delta x_\partial = \Delta x_\partial - = \frac{z_\partial k}{M_{max} + M_{min}}. \tag{14}$$

З рівняння (11) випливає також, що допуск на віддаль y розподіляється симетрично відносно розрахункового значення, тому що за абсолютною величиною

$$\Delta y_\partial + = \Delta y_\partial - = \Delta y_\partial.$$

Значення Δx_∂ і Δy_∂ прямо пропорційні множнику $z_\partial k$, тобто чим більші допустимий діаметр кружка розсіяння і ступінь діафрагмування об'єктива, тим більші допустимі відхилення оригіналу і фотошару від їх розрахункових положень. Діаметр z_∂ допустимого кружка розсіяння вибирають у залежності від призначення негатива, з урахуванням його наступного збільшення. Для великоформатних негативів без наступного збільшення приймається звичайно $z_\partial = 0{,}1$ *мм* [4].

Становить інтерес більш детально розглянути, як залежать значення Δx_∂ і Δy_∂ від вибраних значень $M_{\max}$ і $M_{\min}$ та коефіцієнта перекриття по масштабам $\alpha = \frac{M_{\max}}{M_{\min}}$. Для цього зручно розглянути нормовані залежності:

$$\frac{\Delta x_\partial}{z_\partial k} = \frac{1}{M_{\min}(1+\alpha)}; \tag{15}$$

$$\frac{\Delta y_\partial}{z_\partial k} = \frac{1 + (1 + M_{\min})\alpha}{1+\alpha}, \tag{16}$$

графіки яких справедливі для будь-яких значень z_∂ і k. На рис. 3 зображені графіки вказаних залежностей в діапазоні змін α, що включає в себе найчастіше застосовувані значення. З наведених графіків видно, що характер залежностей (15) і (16) різний. Так, наприклад, допуск

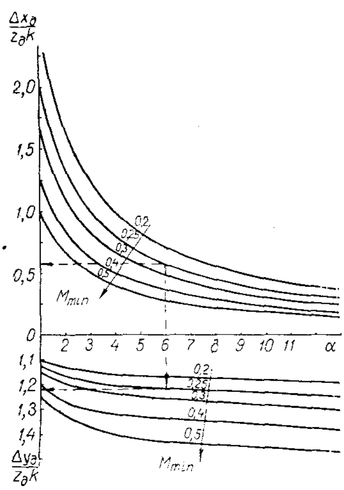

Рис. 3. Графіки залежностей $\frac{\Delta x_\partial}{Z_\partial K} = f(M_{\min}\, \alpha) \cdot \frac{\Delta x_\partial}{Z_\partial K} = f(M_{\min}\, \alpha)$

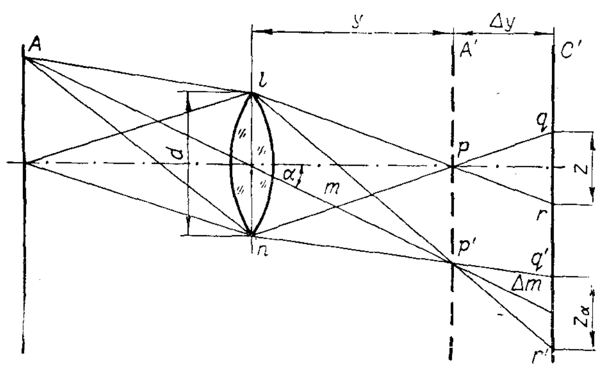

Рис. 4. Схема для визначення діаметра кружка розсіяння для області, розташованої поза оптичною віссю об'єктива.

Δx_∂ на відхилення оригіналу від розрахункового значення досить сильно залежить як від $M_{\min}$, так і від α, причому зі збільшенням $M_{\min}$ і α величина допуску зменшується. В цей же час допуск Δy_∂ на відхилення фотошару від розрахункового значення зі збільшенням $M_{\min}$ і α зростає, причому величина допуску визначається в основному заданим значенням мінімального масштабу зйомки $M_{\min}$ і незначно змінюється при збільшенні коефіцієнта перекриття за масштабом.

Графіки рис. 3 являють собою номограму, досить зручну для практичного визначення Δx_∂ і Δy_∂.

Припустимо, що треба визначити допуски Δx_∂ і Δy_∂ для фотоапарата з такими параметрами: $M_{\min} = 0{,}25$; $M_{\max} = 1{,}5$; $k = 9$ $z_\partial = 0{,}1$ *мм*.

Визначаємо коефіцієнт перекриття за масштабом

$$\alpha = \frac{M_{\max}}{M_{\min}} = \frac{1{,}5}{0{,}25} = 6.$$

З графіків рис. 3 визначаємо:

$$\frac{\Delta x_\partial}{z_\partial k} = 0{,}58; \quad \frac{\Delta y_\partial}{z_\partial k} = 1{,}215.$$

Звідси

$$\Delta x_\partial = 0{,}58 \ z_\partial k = 0{,}58 \cdot 0{,}1 \cdot 9 = 0{,}52 \ \textit{мм};$$
$$\Delta y_\partial = 1{,}215 \ z_\partial k = 1{,}215 \cdot 0{,}1 \cdot 9 = 1{,}09 \ \textit{мм}.$$

На закінчення слід відмітити, що аналіз впливу похибок установки оригіналу і фотошару на різкість зображення, проведений вище для центрального пучка, справедливий для будь-яких випадків. В цьому легко переконатися, розглянувши рис. 4. Дійсно, з подібності трикутників lnp і pqr випливає

$$z = d \cdot \frac{\Delta y}{y}.$$

В той же час

$$m = \frac{y}{\cos\alpha}; \quad \Delta m = \frac{\Delta y}{\cos\alpha}.$$

З подібності трикутників lnp' і $p'q'r'$ випливає

$$z_\alpha = d \cdot \frac{\Delta m}{m} = d \frac{\Delta y}{y} = z.$$

Таким чином, діаметр кружка розсіяння, який виникає через неточну установку оригіналу і фотошару відносно їх розрахункових положень, не залежить від кута α і залишається постійним в границях кута поля зору об'єктива.

ЛІТЕРАТУРА

1. А. Гальперин. Глубина резко изображаемого пространства при кино- и фотосъемке. «Искусство», М., 1958.
2. А. А. Лапаури. Фотографическая оптика. «Искусство», М., 1955.
3. А. Н. Чернышев. Анализ принципов построения и использования полиграфических фоторепродукционных аппаратов. Автореферат канд. диссертации, М., 1953.
4. А. Е. Конради. Фотографическая оптика. Сб. «Фотография в науке и практике», Гизлегпром, М., 1934.

V. A. EDEMSKIJ, G. G. LEBED, D. A. NASAROV

THE DETERMINATION OF PRECISION PARAMETERS OF INVERSOR MECHANISMS OF REPRODUCTION CAMERAS

Summary

The analysis of tolerances for the mounting the original copy and photolayer in the reproduction camera with regard for the achieving the necessary photo-image sharpness is carried out. The calculation formulas and a nomograph, which allow to determine the indicated tolerances on the base of given parameters of photographic system (the range of reproduction scale, focal distance and lighting power of reproduction objective), are adduced.