

## РАСЧЕТ ЗАЗОРОВ В СОПРЯЖЕНИЯХ ДЕТАЛЕЙ ЛИНЗОВЫХ УЗЛОВ ОБЪЕКТИВА И ЕГО ЮСТИРОВКА

Л. И. КРЫНИН<sup>1</sup>, С. М. ЛАТЫЕВ<sup>2</sup>, А. Г. ТАБАЧКОВ<sup>2</sup>,  
Д. Н. ФРОЛОВ<sup>3</sup>, М. С. ГНЕЗДИЛОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО „ЛОМО“, 194044, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: smlatyev@yandex.ru

<sup>3</sup>ООО „Техническая оптика“, 197375, Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются особенности расчета вероятных зазоров в посадках деталей линзовых объективов и влияние условий сборки и юстировки узлов на центрировку объектива и качество создаваемого изображения. Проанализированы характеристики полей рассеяния и допусков погрешностей сопрягаемых размеров деталей при расчетах вероятных значений получаемых зазоров. Зазоры, являясь случайными погрешностями, имеют значительную систематическую составляющую, обусловленную систематическими составляющими погрешностей сопрягаемых размеров деталей. Показано, что сборка линзового объектива с „горизонтальным“ расположением корпуса позволяет в несколько раз уменьшить влияние зазоров на точность центрировки компонентов объектива по сравнению с „вертикальным“ расположением, так как в первом случае децентрировка объектива возникает из-за погрешностей диаметров его линзовых компонентов. Для достижения требуемого качества создаваемого объективом изображения необходимо учитывать влияние децентрировки его линзовых компонентов на aberrации в центре и на краю поля изображения.

**Ключевые слова:** зазоры, объективы, качество изображения, центрировка, юстировка

**Введение.** Линзовые объективы — наиболее применяемые функциональные устройства оптических приборов. Типовыми конструкциями современных объективов, качество изображения которых определяется дифракцией (микрообъективы, фотоповторители), являются „насыпные в оправе“ и „штабельные“ [1—4]. Технологические погрешности изготовления и сборки компонентов объектива, в частности зазоры в посадках, приводят к децентрировке его оптической системы и вызывают приращение монохроматических и хроматических aberrаций создаваемого изображения [5, 6]. Зазоры в посадках являются доминирующей причиной возникновения децентрировок, поэтому в работе рассматривается зависимость вероятных значений и смещения линзовых компонентов в зазорах от условий сборки объектива. Так как требуемое качество изображения светосильного объектива достигается в большинстве случаев его юстировкой, в статье рассматривается пример юстировки объектива для обеспечения одинакового значения aberrаций, вызванных децентрировкой компонентов, по всему полю создаваемого изображения.

**Расчет вероятных значений зазоров в сопряжениях деталей линзовых узлов.** В „насыпных в оправе“ конструкциях линзы и склеенные блоки линз закреплены в своих оправе, последовательно устанавливаемых (насыпаемых) в корпус объектива. Линзы и оправы линз сопрягаются с соответствующими деталями по посадкам с гарантированными зазорами, обеспечивающими удобство сборки (разборки) узлов и предотвращающими деформацию деталей при колебаниях температуры. Зазоры могут быть использованы для центрировки линз в оправе, а также для юстировки объектива радиальным сдвигом линз или линзовых

узлов в зазорах их посадок. Вероятные значения зазоров рассчитываются для определения допустимых значений, обуславливающих целевые показатели качества линзовых узлов и объектива. В связи с тем, что технологические погрешности сопрягаемых элементов деталей являются случайными, предельные вероятные значения зазоров ( $\Delta C_{\max, \min}$ ) рассчитываются по „вероятностному методу расчета“ [1, 7] согласно следующей зависимости:

$$\Delta C_{\max, \min} = \overline{\Delta C} \pm \delta C = \left| \overline{\Delta q_{\text{в}}} + \alpha_{q_{\text{в}}} \delta q_{\text{в}} \right| + \left| \overline{\Delta q_{\text{о}}} - \alpha_{q_{\text{о}}} \delta q_{\text{о}} \right| \pm \sqrt{(K_{q_{\text{в}}} \delta q_{\text{в}})^2 + (K_{q_{\text{о}}} \delta q_{\text{о}})^2}, \quad (1)$$

где  $\overline{\Delta C}$  — среднее вероятное значение зазора;  $\delta C$  — половина поля вероятного рассеяния зазора;  $\overline{\Delta q_{\text{в}}}$ ,  $\overline{\Delta q_{\text{о}}}$  — координаты центров полей допусков погрешностей „вала“ (диаметр линзы, наружный диаметр оправы) и „отверстия“ (внутренние диаметры оправы или корпуса);  $\delta q_{\text{в}}$ ,  $\delta q_{\text{о}}$  — половины полей допусков на погрешности диаметров вала и отверстия;  $\alpha_{q_{\text{в}}}$ ,  $\alpha_{q_{\text{о}}}$  — относительные коэффициенты асимметрии поля рассеяния диаметров валов и отверстий;  $K_{q_{\text{в}}}$ ,  $K_{q_{\text{о}}}$  — коэффициенты относительного рассеяния погрешностей диаметров сопрягаемых деталей, учитывающие вид закона рассеяния и расположение поля рассеяния относительно границ поля допуска.

Значения относительных коэффициентов асимметрии поля рассеяния диаметров линз и оправ, как известно, зависят от метода обработки деталей, оборудования, законов рассеяния погрешностей, допустимого процента брака и т.д. На этапе проектирования конструкции объектива определить правильные значения этих коэффициентов в подавляющем большинстве случаев (даже для конкретного производства) не представляется возможным. Поэтому в связи с тем, что изменение расположения центров группирования ( $a = \alpha_q \delta q$ ) действительных рассеяний погрешностей диаметров сопрягаемых деталей относительно центров полей их допусков невелико:  $a = (0-0,2)\Delta q$  (где  $\Delta q$  — поле допуска); если значения коэффициентов неизвестны, они принимаются равными нулю. Рассеяние погрешностей диаметров линз и оправ в подавляющем большинстве случаев подчиняется закону Гаусса [8]. Однако если поле рассеяния погрешности меньше поля допуска (линза, оправка и корпус изготовлены на прецизионном оборудовании), то  $K_q < 1$  [1]. Если поле рассеяния (по Гауссу) симметрично или односторонне выходит за поле допуска, то  $K_q > 1$  (линза, оправка и корпус изготовлены на „грубом“ оборудовании). Только в случае, когда поле рассеяния погрешности совпадает с полем допуска („правильно“ подобрано оборудование),  $K_q = 1$ . Именно этот случай обычно принимают при расчетах, поскольку на этапе проектирования точность оборудования (которое будет использоваться) неизвестна. В связи с этими обстоятельствами расчеты вероятных значений зазоров в сопряжениях могут быть выполнены по следующей приближенной зависимости:

$$\Delta C_{\max, \min} = \overline{\Delta C} \pm \delta C = \left| \overline{\Delta q_{\text{в}}} \right| + \left| \overline{\Delta q_{\text{о}}} \right| \pm \sqrt{\delta q_{\text{в}}^2 + \delta q_{\text{о}}^2}. \quad (2)$$

На рис. 1, а представлено расположение полей рассеяния погрешностей сопрягаемых диаметров „вала“ (1) и „отверстия“ (2) относительно их номинального значения ( $\varnothing D_0$ ), а на рис. 1, б приведено поле рассеяния зазора в их сопряжении.

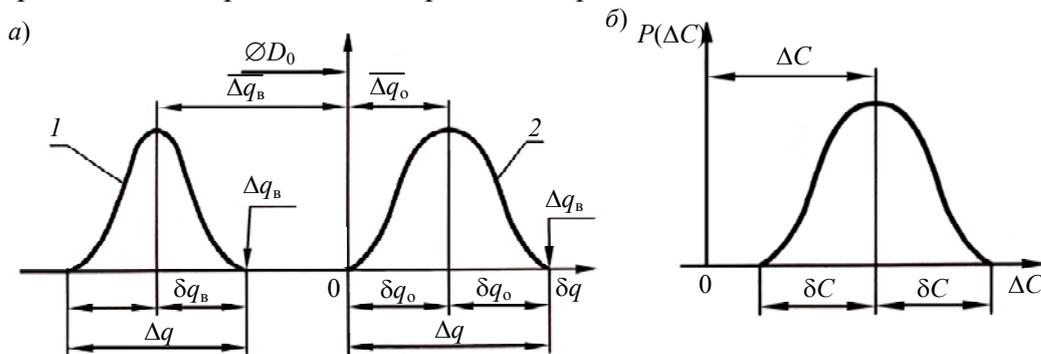


Рис. 1

**Смещения линзовых компонентов объектива „насыпной в оправках“ конструкции и его юстировка.** Для уменьшения влияния зазоров в сопряжениях линз с оправками и других погрешностей сопрягаемых деталей (децентрировки линз при изготовлении, биения опорных торцов и посадочных отверстий оправ и т.д.) на центрировку линз относительно базовых осей их оправ обычно используется метод результативной обработки базовых поверхностей оправ от оптических осей закрепленных в них линз или метод центрировки линз при креплении их (завальцовкой, клеиванием) в оправы [9—12]. Зазоры в посадках линзовых узлов в корпус объектива приводят к возможному смещению узлов с базовой (оптической) оси объектива. Децентрировка от зазоров линзовых компонентов „насыпной в оправках“ конструкции объектива существенно зависит от условий его сборки.

Если корпус объектива расположен вертикально, смещения ( $\Delta S_i$ ) компонентов могут достигать половины максимальных значений зазоров в их посадках  $\Delta S_i = \Delta C_{\max i} / 2$ , причем направления этих векторных погрешностей изменяются в пределах  $0—360^\circ$  по равновероятному закону [8].

При „горизонтальной“ сборке линзовые компоненты под действием сил тяжести (иногда принудительно) смещаются до нижней образующей цилиндрического отверстия корпуса (рис. 2). Эта поверхность становится реальной сборочной базой (в отличие от теоретической базы — оси внутреннего цилиндра корпуса). Значения децентрировки линз компонентов в этом случае будут скалярными, и их максимумы будут определяться не зазорами в посадках, а погрешностями диаметров их оправ  $\Delta S_i = \Delta d_i / 2 = \delta d_i$ , где  $\Delta d$ ,  $\delta d$  — поле и половина поля допуска на погрешность диаметра оправы компонента. С учетом одинакового (отрицательного) знака систематических составляющих случайных погрешностей диаметров оправ предельное вероятное значение децентрировки одного линзового компонента относительно другого может быть определено по следующей зависимости:

$$\Delta S_{1,2} = \frac{(\overline{\Delta d_1} - \overline{\Delta d_2}) \pm \sqrt{\delta d_1^2 + \delta d_2^2}}{2}, \quad (3)$$

где  $\overline{\Delta d_1}$ ,  $\overline{\Delta d_2}$ ,  $\delta d_1$ ,  $\delta d_2$  — координаты центров полей допусков и половины полей рассеяния погрешностей диаметров оправ. При одинаковых положениях полей допусков (посадок) и качествах точности оправ ( $\overline{\Delta d_1} = \overline{\Delta d_2}$ ,  $\delta d_1 = \delta d_2 = \delta d$ ) получаем  $\Delta S_{1,2} \approx 0,7\delta d$ . Сравнение значений децентрировки компонентов при горизонтальном и вертикальном способах сборки объективов показывает, что горизонтальная сборка позволяет в несколько раз уменьшить влияние зазоров на точность их центрировки.

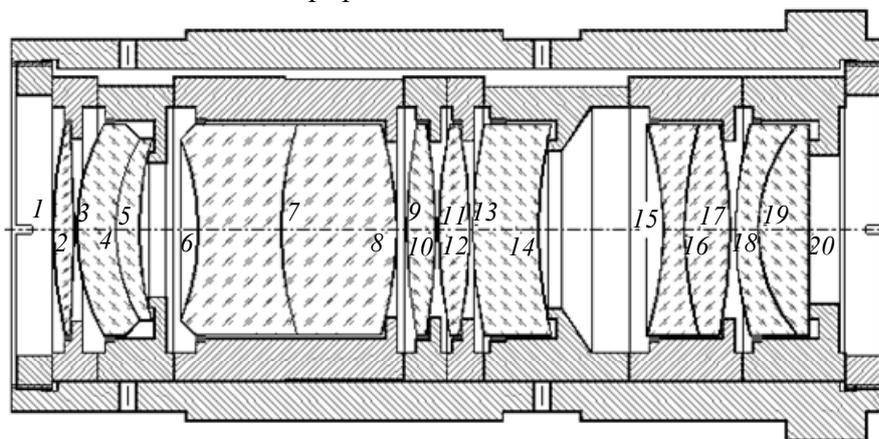


Рис. 2

В светосильных объективах остаточные децентрировки линзовых компонентов, как правило, не позволяют получить требуемое качество изображения. Оно достигается юстировкой, трудоемкость которой особенно высока, когда качество создаваемого изображения

определяется дифракцией и одинаково в центре и на краю изображения. Рассмотрим это на примере юстировки объектива фотоповторителя, содержащего восемь линзовых компонентов (рис. 2). Данный объектив [4] должен обеспечивать волновую aberrацию в пределах всего поля изображения не более  $0,5\lambda$ . Объектив имеет следующие технические характеристики: линейное увеличение  $V = -0,25\times$ ; диаметр поля изображения 35 мм; числовая апертура в пространстве изображений  $A' = 0,16$ ; рабочая длина волны  $\lambda = 436$  мкм. В таблице представлены номера рабочих поверхностей линз объектива, волновые aberrации в центре поля  $\omega_k$  (кома) и изменения волновой aberrации в меридиональном  $\omega_m$  и сагиттальном  $\omega_s$  сечениях для края поля при децентрировке рабочих поверхностей на величину  $\Delta C$ .

Поверхность	$\Delta C$ , мм	$\omega_k$ , мкм	$\Delta\omega_m$ , мкм	$\Delta\omega_s$ , мкм
1	0,010	0,020	-0,043	-0,008
2	0,050	0,003	-0,018	-0,001
3	0,010	0,012	0,064	0,053
4	0,050	0,000	0,000	0,000
5	0,010	-0,051	-0,069	-0,056
6	0,005	-0,010	0,115	0,049
7	0,010	-0,035	0,002	0,006
8	0,010	0,007	-0,072	-0,067
9	0,010	0,013	0,007	-0,003
10	0,010	0,021	-0,047	-0,019

Поверхность	$\Delta C$ , мм	$\omega_k$ , мкм	$\Delta\omega_m$ , мкм	$\Delta\omega_s$ , мкм
11	0,010	0,019	0,037	0,019
12	0,050	0,047	-0,044	0,003
13	0,005	-0,012	0,038	0,042
14	0,005	0,010	-0,103	-0,072
15	0,010	-0,014	-0,015	-0,009
16	0,010	0,002	0,039	0,009
17	0,010	0,013	0,050	0,022
18	0,010	0,006	-0,030	0,010
19	0,050	0,000	0,014	-0,003
20	0,050	-0,011	-0,048	-0,063

Достичь требуемого качества изображения в таких объективах обычно возможно радиальным сдвигом одного или нескольких линзовых компонентов в зазорах их посадок в корпус. Однако при сдвиге произвольно выбранного компонента (например, четвертого) можно компенсировать aberrацию только в центре поля, но при этом увеличить aberrации на краю (и наоборот). Анализ влияния децентрировки рабочих поверхностей линзовых компонентов этого объектива на aberrации позволяет найти способ юстировки объектива по качеству изображения в центре и на краю поля. Например, радиальный сдвиг второго компонента в корпусе объектива позволит компенсировать кому на оси (практически не изменяя aberrации на краю), а радиальный сдвиг шестого компонента позволит скомпенсировать aberrации на краю поля (не изменяя aberrацию в центре).

**Выводы.** Расчет вероятных значений зазоров в сопряжении линз с оправками и линзовых узлов с корпусом объектива целесообразно осуществлять по приближенной зависимости, позволяющей определить их значения исходя из полей допусков на размеры сопрягаемых деталей.

Влияние зазоров в сопряжениях линзовых узлов с корпусом объектива на центровку линзовых объективов зависит от условий их сборки. При „горизонтальной“ сборке объектива „насыпной в оправках“ конструкции смещения оправ линзовых узлов в зазорах вызывают в несколько раз меньшие значения взаимных децентрировок компонентов по сравнению с „вертикальной“ сборкой. Юстировка объектива по качеству изображения в центре и на краю поля осуществляется различными линзовыми компонентами, выбор которых производится на основании степени их влияния на соответствующие aberrации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Лань, 2015.
2. Latyev S .M., Bui Dinh B., Beloivan P. A., Tabachkov A. G. Analysis of certain issues in the assembly of fast objectives // J. of Optical Technology. 2015. Vol. 82, N 12. P. 796—799.
3. Frank S. Justierdrehen — eine Technologie für Hochleistungsoptik // Bericht IMK 14. Technische Universität Ilmenau, 2008. S. 150.

4. Yoder P. R. Mounting Optics in Optical Instruments. Washington, USA: SPIE PRESS Bellingham, 2008.
5. Губель Н. Н. Аберрации децентрированных оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975.
6. Русинов М. М., Грамматин А. П., Иванов П. Д. и др. Вычислительная оптика. Справочник. Л.: Машиностроение, 1984.
7. Кулагин В. В. Основы конструирования оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982.
8. Крынин Л. И. Основы проектирования конструкций объективов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
9. Latyev S. M., Rumyantsev D. M., Kuritsyn P. A. Design and process methods of centering lens systems // J. of Optical Technology. 2013. Vol. 80, N 3. P. 197—200.
10. Heinisch J. Zentrierfehler messen, Optiken automatisch justieren und montieren // Photonik. 2008. N 6. S. 46—48.
11. Sondermann M. Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer Hochleistungssysteme // Bericht IMGK. Bd 19. Technische Universitaet Ilmenau, 2011. S. 145.
12. Langehanenberg P., Heinisch J., Stickler D. Smart and precise alignment of optical systems // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8884. Art. no. 8884-88.

#### Сведения об авторах

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Лев Иванович Крынин</b>          | — канд. техн. наук; АО „ЛОМО“; нач. лаборатории;<br>E-mail: tanykv@yandex.ru  |
| <b>Святослав Михайлович Латыев</b>  | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: smlatyev@yandex.ru |
| <b>Алексей Геннадьевич Табачков</b> | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: aletab@yandex.ru    |
| <b>Дмитрий Николаевич Фролов</b>    | — канд. техн. наук; ООО „Техническая оптика“; техн. директор; E-mail: fronda@list.ru  |
| <b>Мария Сергеевна Гнездилова</b>   | — студентка; Университет ИТМО; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: mariy-94@mail.ru                   |

Рекомендована кафедрой  
кафедра компьютерной фотоники  
и видеоинформатики

Поступила в редакцию  
09.11.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Крынин Л. И., Латыев С. М., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Гнездилова М. С. Расчет зазоров в сопряжениях деталей линзовых узлов объектива и его юстировка // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 353—358.

### CALCULATION OF BACKLASHES IN CONJUGATION OF OPTICAL COMPONENTS OF A LENS AND ITS ADJUSTMENT

L. I. Krynin<sup>1</sup>, S. M. Latyev<sup>2</sup>, A. G. Tabachkov<sup>2</sup>, D. N. Frolov<sup>3</sup>, M. S. Gnezdilova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LOMO JSC, 194044, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: smlatyev@yandex.ru

<sup>3</sup>Technical Optics Ltd., 197375, St. Petersburg, Russia

Calculation of probable backlashes in plantings details of objective lens and influence of conditions of unit assembly and adjustment on lens centering and image quality are considered. Characteristics of the fields of scattering and errors tolerances of backlashes of conjugated details are analyzed for the probable values of the resulting backlashes. Being casual errors, backlashes are noted to possess a significant regular component caused by regular errors in conjugated components dimensions. Assembly of a lens with horizontal chassis position is shown to allow for reduction of backlashes influence on the accuracy of lens components centering as compared to the "vertical" arrangement when the lens centering breaks because of errors of the diameters of the lens components. To achieve the required quality of generated image, it is necessary to consider the effect of violation of centering of the lens components on aberration at the center and at the edge of the image field.

**Keywords:** backlashes, lens, image quality, centering, adjusting

**Data on authors**

- Lev I. Krynin** — PhD, LOMO JSC; Head of Laboratory; E-mail: tanykv@yandex.ru  
**Svyatoslav M. Latyev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer Photonics and Digital Video Processing; E-mail: smlatyev@yandex.ru  
**Alexey G. Tabachkov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Computer Photonics and Digital Video Processing; E-mail: aletab@yandex.ru  
**Dmitry N. Frolov** — PhD; Technical Optics Ltd.; Technical Director; E-mail: fronda@list.ru  
**Mariya S. Gnezdilova** — student; ITMO University, Department of Computer Photonics and Digital Video Processing; E-mail: mariy-94@mail.ru

**For citation:** *Krynin L. I., Latyev S. M., Tabachkov A. G., Frolov D. N., Gnezdilova M. S.* Calculation of backlashes in conjugation of optical components of a lens and its adjustment // *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 4. P. 353—358 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-353-358