УДК 681.4.07

А. П. Смирнов, С. М. Латыев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ МИКРООБЪЕКТИВОВ

Приведен вывод соотношений, положенных в основу алгоритма автоматической сборки микрообъективов с учетом технологических погрешностей их компонентов.

Ключевые слова: *микрообъектив, сборка, автоматизация, модель.*

Алгоритм автоматической сборки микрообъективов базируется на математической модели реальной конструкции, учитывающей технологические погрешности ее компонентов [1, 2]. Критериями качества сборки микрообъектива из реальных компонентов (с погрешностями) являются его суммарные аберрации — сферическая, кома, дисторсия, астигматизм, которые на практике выявляются по дифракционному изображению точки. В предлагаемой в настоящей статье модели оптимизация конструкции осуществляется по критериям минимума сферической аберрации и комы. Для вычисления целевой функции требуется информация о пространственном положении всех оптических поверхностей микрообъектива. Решению этой задачи и посвящена настоящая статья.

Рассмотрим обобщенный компонент микрообъектива, представляющий собой линзу, заключенную в оправу (рис. 1, *а*), где базовыми поверхностями являются плоскость *A* и цилиндр *E*, образующие базовую ось *EA*. На рис. 1, *б*, *в* показаны измеренные параметры и первичные погрешности обобщенного компонента, лежащие в пределах соответствующих допусков.

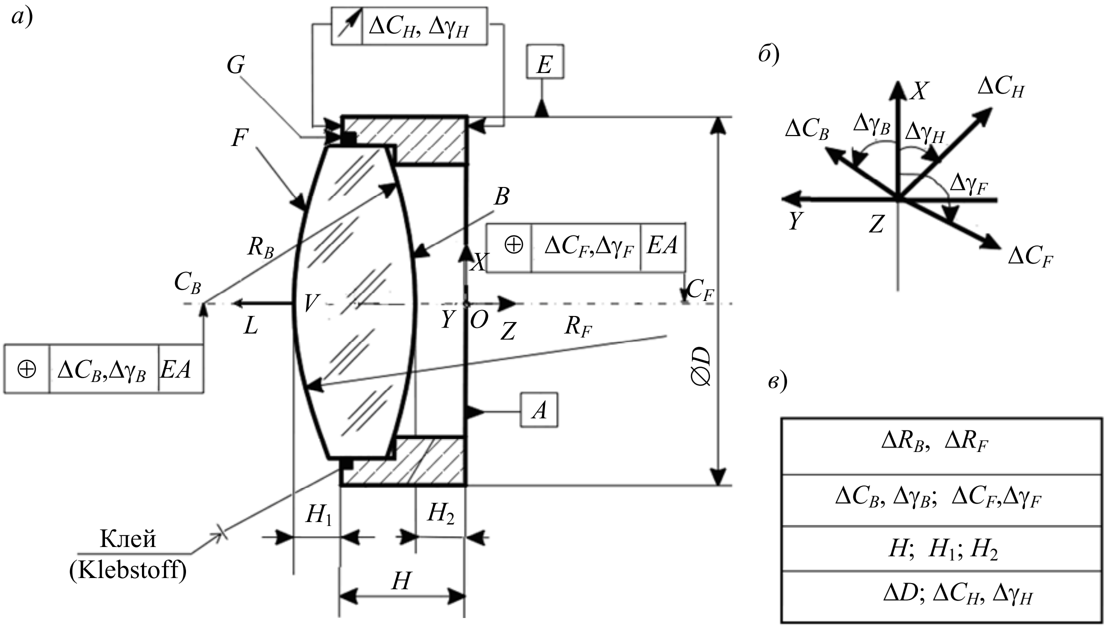

Рис. 1

Оптические поверхности будем задавать координатами вершины *V* и ортом *L* нормали к поверхности в точке вершины во внешней системе координат (*OXYZ*), ось аппликат которой направлена вдоль оптической оси, ось абсцисс, например, вертикальна, а ось ординат — горизонтальна. Начало координат находится на одной из базовых плоскостей, например, первого компонента по ходу лучей. Координаты вершины и направление нормали зависят от параметров элементов объектива и погрешностей, технологических и конструктивных, связанных с креплением объектива.

Базовая ось *EA* используется для центрировки поверхностей линзы при ее вклейке или результативной обработке оправы после вклейки линзы. Относительно поверхности *A* задаются допуски на торцевое биение, в результате которого рабочая плоскость *G* оправы имеет наклон к вертикальной плоскости OXY. Торцевое биение (согласно ГОСТ 24642-83) — это разность наибольшего и наименьшего расстояний ΔC_H от базовой плоскости, перпендикулярной базовой оси, до рабочей плоскости. Помимо этого параметра, для определенности должны быть известны азимут наклона $\Delta\gamma_H$ относительно координатной оси *OX* (или метка наклона) и абсолютное значение толщины *H* оправы в плоскости сечения, отмеченной меткой (рис. 2). В зоне, отмеченной меткой, торцевое биение максимально.

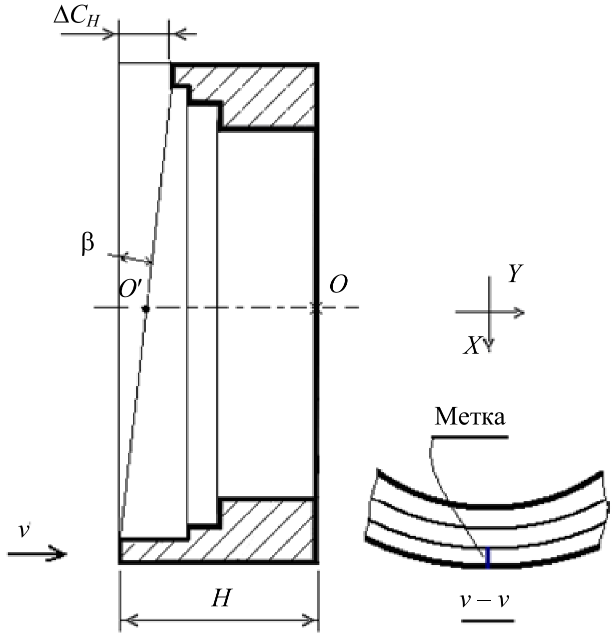

Рис. 2

Измерение толщин *H*, H_1 и H_2 оправы осуществляется по единой линии в одной меридиональной плоскости. Азимутальные углы эксцентриситетов отсчитываются от метки на торце оправы (см. рис. 2). С помощью измеренных величин толщин и параметров эксцентриситетов вершин определяются положения вершин и направления нормалей к оптическим поверхностям. Для удобства изложения отметим 6 этапов, ведущих к решению поставленной задачи.

1. Определение параметров вершины оптической поверхности в локальной системе координат. В локальной системе координат, с началом координат в точке *O* пересечения оптической оси базовой плоскостью *A* (см. рис. 1 и 2), координаты вершин поверхностей любого компонента объектива с учетом децентрировки определяются как

$$\begin{aligned} V_F &= \Delta C_F \cos(\Delta\gamma_F)\cdot \mathbf{i} + \Delta C_F \sin(\Delta\gamma_F)\cdot \mathbf{j} + (H_1 - H)\cdot \mathbf{k}, \\ V_B &= \Delta C_B \cos(\Delta\gamma_B)\cdot \mathbf{i} + \Delta C_B \sin(\Delta\gamma_B)\cdot \mathbf{j} - H_2 \cdot \mathbf{k}. \end{aligned} \tag{1}$$

Нормаль к оптической поверхности в этой же локальной системе координат коллинеарна оси аппликат: $\mathbf{L} = \mathbf{k}$.

2. Вычисление глобальных координат реперной точки. Локальные координаты реперной точки имеют начало на оптической оси в центре оправы (точка *O* на рис. 2); глобальные координаты этой точки зависят от параметров торцевого биения соприкасающихся компонентов. Координаты реперной точки Z_{k+1}, ее аппликата, как следует из рис. 3, определяются как проекция векторного суммирования:

$$Z_{k+1} = Z_k + c_1 + c_2 + c_3, \tag{2}$$

$$c_1 = \frac{D_{k+1}}{2}\sin\beta_k; \quad c_2 = HN_k; \quad c_3 = \frac{D_{k+1}}{2}\sin\beta_{k+1}; \quad \mathrm{tg}\,\beta = \frac{\Delta C_H}{D},$$

где β_k и β_{k+1} — углы наклона плоскостей к вертикальной плоскости; N_k — нормаль к k-й оптической поверхности.

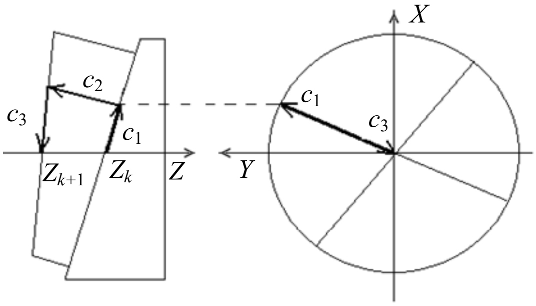

Рис. 3

3. Определение нормали к плоскости, имеющей торцевое биение. Рассмотрим результат присоединения базовой плоскости A компонента к плоскости, имеющей вследствие торцевого биения наклон на угол β и на азимутальный угол $\Delta\gamma_H$, отмеченный меткой (см. рис.2). Тогда нормаль к оптической поверхности можно описать вектором N (рис. 4):

$$N = \begin{pmatrix} \sin\beta\cos(\Delta\gamma_H - \pi) \\ \sin\beta\sin(\Delta\gamma_H - \pi) \\ \cos\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\beta\cos(\Delta\gamma_H) \\ -\sin\beta\sin(\Delta\gamma_H) \\ \cos\beta \end{pmatrix}. \qquad (3)$$

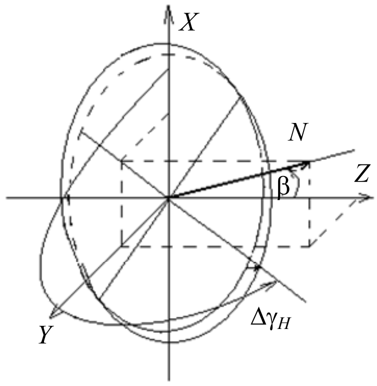

Рис. 4

4. Определение координат центра оправы относительно реперной точки и направления нормали к оптической поверхности. Определим координаты точки O (см. рис. 2) — центра базовой поверхности — в результате ее присоединения к наклонной плоскости, когда компонент сдвигается по опорной плоскости вниз (рис. 5) и точка O перемещается в точку U.

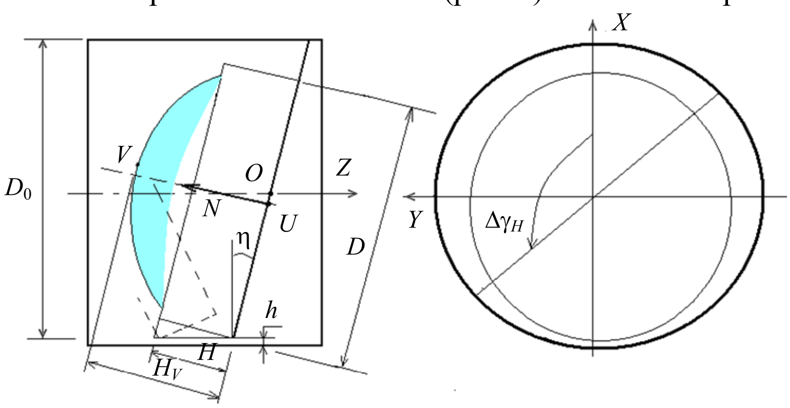

Рис. 5

Положим, что сборка микрообъектива происходит при горизонтально расположенном тубусе (см. рис. 5). Примыкающая деталь находится слева от опорной плоскости. Тогда нормаль к опорной плоскости равна вектору $N_{\text{оп}} = (\sin\beta, 0, \cos\beta)$. В общем случае нормаль к опорной плоскости и оптической поверхности с помощью матрицы поворота относительно оси аппликат (M_Z) характеризуется выражением

$$N_{\text{оп}} = M_Z\left(-\Delta\gamma_H\right)\begin{pmatrix}\sin\beta\\ 0\\ \cos\beta\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\sin\beta\cos(\Delta\gamma_H)\\ \sin\beta\sin(\Delta\gamma_H)\\ \cos\beta\end{pmatrix}. \quad (4)$$

Кроме матрицы поворота относительно оси OZ, необходимо определить матрицу поворота относительно оси OY, они имеют следующий вид:

$$M_Y(x) = \begin{pmatrix}\cos x & 0 & -\sin x\\ 0 & 1 & 0\\ \sin x & 0 & \cos x\end{pmatrix}, \qquad M_Z(\gamma) = \begin{pmatrix}\cos x & \sin x & 0\\ -\sin x & \cos x & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}. \quad (5)$$

Углы поворота (η, θ) нижней направляющей цилиндра оправы относительно осей OY и OX согласно выражению (4) определяются как

$$\mathrm{tg}\eta = \frac{N_X}{N_Z} = \mathrm{tg}\beta\cos\left(\Delta\gamma_H\right), \quad \mathrm{tg}\theta = \frac{N_Y}{N_Z} = \mathrm{tg}\beta\sin\left(\Delta\gamma_H\right), \quad (6)$$

где N_X, N_Y, N_Z — проекции нормали N на координатные оси.

Вследствие поворота детали вокруг вертикальной оси при перемещении вниз она не достигнет самой нижней точки тубуса. Тогда высота h (рис. 6) определяется из выражения

$$h = \frac{D_0 - \sqrt{D_0^2 - H^2\sin^2\theta}}{2} \approx \frac{H^2\sin^2\theta}{4D_0}. \quad (7)$$

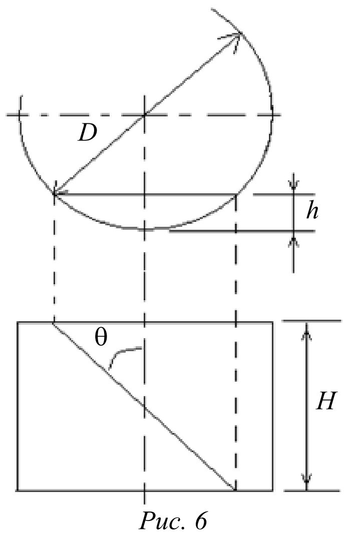

Рис. 6

Прилегание боковых плоскостей смежных деталей произойдет, если боковой зазор имеет достаточную величину. Это условие справедливо при выполнении соотношения

$$H\sin\left(\Delta\gamma_H\right) + D\mathrm{tg}\left(\Delta\gamma_H\right) \le D_0. \quad (8)$$

В этом случае в зависимости от того, принадлежит ли азимутальный угол левой или правой полуплоскости, координаты центра U примыкающей детали, как видно из рис. 5, определяются как

$$U=\frac{1}{2}\begin{pmatrix} D\cos\eta - D_0 + h \\ 0 \\ D\sin\eta + (D_0 - h)\mathrm{tg}\beta\cos\left(\Delta\gamma_H\right) \end{pmatrix}, \quad \frac{\pi}{2} \le \Delta\gamma_H \le \frac{3\pi}{2};$$
$$U=\frac{1}{2}\begin{pmatrix} D\cos\eta - D_0 + h + 2H\sin\eta \\ 0 \\ -D\sin\eta + (D_0 - h)\mathrm{tg}\beta\cos\left(\Delta\gamma_H\right) \end{pmatrix}, \quad \Delta\gamma_H \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \cup \left[\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right]. \tag{9}$$

Если же условие (8) не выполняется, возникает неопределенность положения примыкающей детали, поэтому алгоритм решения задачи прерывается и исследуется иная комбинация комплектующих деталей.

5. Определение координат вершины поверхности относительно реперной точки. Зная положение точки U на опорной плоскости (см. формулы (9)) и направление нормали к опорной плоскости, координаты вершины оптической поверхности можно определить путем векторного суммирования:

$$V = U + M_Z(\Delta\gamma_H)M_Y(\beta)V_0, \tag{10}$$

где $V_0 = V_F$ или V_B, которые определены в уравнениях (1).

6. Определение направления нормали к опорной плоскости при накапливании технологических погрешностей. При автоматизированной сборке конструкции микрообъектива положение опорной плоскости определяется наклонами всех задействованных плоскостей. Пусть текущий угол наклона опорной плоскости β_i, азимутальный угол наклона $\Delta\gamma_{H,i}$, соответствующие углы примыкающей плоскости: $\beta_{i+1}, \Delta\gamma_{H,i+1}$. Как видно из рис. 4, вследствие поворотов, описываемых произведением матриц $M_Y(\beta_i)M_Z(-\Delta\gamma_{H,i})$, орт опорной плоскости коллинеарен оси OZ, поэтому обратное преобразование, примененное к орту нормали к примыкающей плоскости, даст результирующее направление нормали:

$$N'_{i+1} = M_Z(\Delta\gamma_{H,i})M_Y(-\beta_i)N_{i+1}.$$

Таким образом, алгоритм определения координат вершин и направлений нормалей к поверхности компонентов микрообъектива состоит в следующем.

Д а н о :

1) положение первой опорной плоскости: параметры торцевого биения $\Delta C_{H,0}, \Delta\gamma_{H,0}$ и аппликата Z_0 опорной плоскости, измеренная по нулевому азимуту;

2) параметры торцевого биения $\Delta C_{H,i}, \Delta\gamma_{H,i}$ и толщины H_i оправ компонентов (см. рис.1), измеренные по нулевому азимуту, $i = 1, 2, ..., K$;

3) параметры радиального биения оптических поверхностей: $\Delta C_{F,i}, \Delta\gamma_{F,i}, \Delta C_{B,i}, \Delta\gamma_{B,i}$;

4) диаметр тубуса D_0 и диаметры оправ D_i.

О п е р а ц и и : декартова система координат располагается так, что ось OZ совпадает с геометрической осью тубуса, ось OX — вертикальная, ось OY — горизонтальная. Начало координат выбрано так, что аппликата первой опорной плоскости Z_0=0.

Р е ш е н и е .

Шаг 1. Назначение счетчика компонента: i=0. Начальные значения параметров базовой плоскости начальной опорной детали: $Z_0 = 0, \beta_0 = 0, \Delta\gamma_{H,0} = 0$.

Шаг 2. Введение номера следующего компонента: i+1.

Шаг 3. Определение критерия контакта (КК) плоскостей согласно формуле (8): $KK = D_0 - H_i\sin\left(\Delta\gamma_{H,i-1}\right) + D_i\mathrm{tg}\left(\Delta\gamma_{H,i-1}\right)$.

Шаг 4. При условии КК < 0 прерывание вычислений с сообщением о необходимости замены набора компонентов.

Шаг 5. Вычисление угла наклона опорной плоскости к вертикальной плоскости:

$$\beta_i = \operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta C_{H,i-1}}{D_{i-1}}\right).$$

Шаг 6. Определение направления нормали к опорной плоскости с использованием формул (3) и (5): $N_i' = M_Z(\Delta\gamma_{H,i-1})M_Y(-\beta_{i-1})N_i$.

Шаг 7. Определение аппликаты точки пересечения O_i опорной плоскости и оси OZ согласно формуле (2):

$$Z_i = Z_{i-1} + \frac{D_{i-1}}{2}\left(\sin\beta_{i-1} + \sin\beta_i\right) + H_{i-1}\cos\beta_{i-1}.$$

Шаг 8. Вычисление угла наклона опорной плоскости к горизонтальной плоскости (см. рис. 5) и угла (согласно формуле (6)) между направляющими базового цилиндра и цилиндра оправы (см. рис. 6): $\operatorname{tg}\eta_i = \operatorname{tg}\beta_i \cos\left(\Delta\gamma_{H,i-1}\right)$, $\operatorname{tg}\theta_i = \operatorname{tg}\beta_i \sin\left(\Delta\gamma_{H,i-1}\right)$.

Шаг 9. Вычисление высоты $h_i = \dfrac{D_0 - \sqrt{D_0^2 - H_i^2 \sin^2\theta_i}}{2}$.

Шаг 10. Проверка условия $a = \left\{\dfrac{\pi}{2} \le \Delta\gamma_{H,i-1} \le \dfrac{3\pi}{2}\right\}$.

Шаг 11. При выполнении условия a вычисление координат точки пересечения оптической оси компонента с опорной плоскостью (согласно уравнениям (9)) по формуле

$$U_i = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} D_i\cos\eta_i - D_0 + h_i \\ 0 \\ D_i\sin\eta_i + (D_0 - h_i)\operatorname{tg}\beta_i\cos\left(\Delta\gamma_{H,i-1}\right)\end{pmatrix};$$

при невыполнении условия a — по формуле

$$U_i = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} D_i\cos\eta - D_0 + h_i + 2H_i\sin\eta_i \\ 0 \\ -D_i\sin\eta_i + (D_0 - h_i)\operatorname{tg}\beta_i\cos\left(\Delta\gamma_{H,i-1}\right)\end{pmatrix}.$$

Шаг 12. Определение координат вершин оптических поверхностей, принадлежащих текущей оправе (1) в локальной системе координат:

$$V_{B,i}^{(\text{лок})} = \begin{pmatrix} \Delta C_{B,i}\cos\left(\Delta\gamma_{F,i}\right) \\ \Delta C_B \sin\left(\Delta\gamma_{F,i}\right) \\ H_{2,i}\end{pmatrix}, \quad V_{F,i}^{(\text{лок})} = \begin{pmatrix} \Delta C_{F,i}\cos\left(\Delta\gamma_{F,i}\right) \\ \Delta C_F \sin\left(\Delta\gamma_{F,i}\right) \\ H_{1,i} - H_i\end{pmatrix}.$$

Шаг 13. Определение координат вершин оптических поверхностей в глобальной системе координат согласно формуле (10):

$$\begin{pmatrix} V_{B,i} \\ V_{F,i}\end{pmatrix} = U_i + M_Z(\Delta\gamma_{H,i-1})M_Y(\beta_i)\begin{pmatrix} V_{B,i}^{(\text{лок})} \\ V_{F,i}^{(\text{лок})}\end{pmatrix}.$$

Шаг 14. Если $i \ne K$, то переход к шагу 2, иначе — останов алгоритма с выводом параметров оптических поверхностей.

В дальнейшем предложенная модель может быть использована для построения алгоритма автоматизированной сборки микрообъективов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Latyev S. M., Jablotschnikov E. I., Padun D. S.* et al. Laborotory for automated assembly of microscope lenses // 53 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium, Techn. Univ. Ilmenau, 8—12 Sept. 2008. P. 247—249.

2. *Бурбаев А. М., Егоров Г. В.* Измерение децентрировок линз в оправах для микрообъективов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 4. С. 22—26.

Сведения об авторах

Александр Павлович Смирнов — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: apsmirnov@bk.ru

Святослав Михайлович Латыев — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; зав. кафедрой; E-mail: smlatyev@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
26.04.11 г.