РАСЧЕТ ОТДЕЛЬНЫХ ЛИНЗ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ЭВМ

А. А. ШЕХОНИН. С. А. РОДИОНОВ

Излагается метод автоматического нахождения параметров одиночных линз с заданными параксиальными и аберрационными характеристиками, которые используются при синтезе оптической системы на этапе предварительного проектирования. Приводятся результаты исследования изложенного метода.

Одним из методов построения оптической системы на этапе предварительного проектирования является синтез последней из одиночных линз с заданными свойствами в области реальных аберраций [1, 2].

Метод автоматического проектирования линз с заданными свойствами позволяет освободить конструктора от трудоемких вычислений, производимых при синтезе системы вручную, и расширить возможности для создания новых типов оптических конструкций.

При разработке автоматического метода удобно внешние свойства линзы в воздухе описать обобщенной системой внешних характеристик [3], а в качестве внутренних параметров принять:

$\varphi = \dfrac{1}{f_0'}$ – сила, $\Phi = \dfrac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi}$ – параметр формы, $\bar{d} = \dfrac{d}{n}\varphi$ – приведенная толщина,

где f_0' – заднее фокусное расстояние, $\varphi_1 = (n-1)\rho_1$ – оптическая сила первой поверхности, $\varphi_2 = (n-1)\rho_2$ – сила второй поверхности, d – толщина, а n – показатель преломления. Такое определение позволяет разделить влияние параметров на свойства толстой линзы и, как показали исследования, ускорить сходимость итерационных процессов, используемых в данном методе.

При компоновке системы из отдельных линз нужно учитывать, что линзы должны удовлетворять: а) заданному значению увеличения; б) заданному значению какой-либо аберрации (реже – заданным значениям двух аберраций). По виду коррекции аберраций рационально разделить линзы на четыре группы, которые корригируются: 1) на астигматизм, 2) на дисторсию, 3) на сферическую аберрацию, 4) на астигматизм и кривизну изображения.

Метод автоматического нахождения параметров линзы с заданными свойствами распадается на следующие операции.

I. По заданным значениям внешних характеристик определяется сила линзы φ по формулам, полученным из соотношений параксиальной оптики в соответствии с указанным типом линзы по [4]. Эти формулы имеют вид:

а) для «телескопической системы»

$$\upsilon_0 = S_{pr} + 1;$$

б) для «системы фотообъектива»

$$\upsilon_0 = \frac{1}{\varphi(1 + S_{0r}S_{pr} + S_{0r})};$$

в) для «системы микроскопа»

$$\upsilon_0 = \varphi(1 + S_{0r} + S_{pr});$$

г) для «репродукционной системы»

$$\upsilon_0 = \frac{1}{1 + S_{0r}},$$

где υ_0 – обобщенное увеличение, S_{pr} – обобщенное положение входного зрачка, а S_{0r} – обобщенное положение предмета в единицах силы линзы.

II. Находят такое значение коррекционного параметра формы, которое обеспечивает заданное (либо ближайшее к заданному) значение аберрации. На данном этапе выгодно использовать алгоритмическую связь коррекционного параметра с корригируемой аберрацией. Такая связь устанавливается путем расчета реальных лучей через линзу. В результате получают «лучевое» уравнение относительно параметра Φ, при решении которого численным методом необходимо, чтобы начальное значение параметра было не очень далеким от корня уравнения.

Начальное значение параметра для установленных групп линз целесообразно находить на базе теории аберраций третьего порядка, что одновременно позволяет исследовать все возможные решения. Учитывая принятые обозначения, можно получить следующие выражения для параметров формы линз, свободных от аберраций или имеющих минимальные значения аберраций в области Зейделя:

1) для линз, корригируемых на сферическую аберрацию

$$\Phi_{1,2} = \frac{\frac{n+1}{n} S_{0r} + \frac{2n+1}{4(n-1)} \pm \frac{1}{2}\sqrt{S_{or}^2 + S_{0r} - \frac{4n-1}{4(n-1)^2}}}{\frac{n+2}{4n(n-1)}} - 1. \qquad (1)$$

Из предыдущего выражения следует, что линзы, свободные от сферической аберрации, существуют при выполнении неравенств:

$$S_{0r} \le \frac{1}{2}\left[-1 - \frac{1}{n-1}\sqrt{n(n+2)}\right], \qquad S_{0r} \ge \frac{1}{2}\left[-1 + \frac{1}{n-1}\sqrt{n(n+2)}\right].$$

В противном случае дифференцированием (1) по Φ определяется форма линзы с минимумом сферической аберрации:

$$\Phi_{\min} = \frac{2n(n-1)}{n+2}\left[\frac{2n+1}{2(n-1)} + \frac{2(n+1)}{n} S_{0r}\right] - 1; \qquad (2)$$

2) для линз, корригируемых на астигматизм,

$$\Phi_{1,2} = \frac{\frac{2n+1}{2(n-1)} S_{pr} + \frac{n+1}{n} + \frac{2(n+1)}{n} S_{pr} S_{0r} \pm \sqrt{(S_{or}^2 + S_{0r} - \frac{4n-1}{4(n-1)^2}) S_{or}^2 - \frac{1}{n}(2S_{0r}+1) + \frac{1}{n^2}}}{\frac{n+2}{2n(n-1)} S_{pr}} - 1. \qquad (3)$$

Из (3) видно, что анастигматические линзы могут существовать только при условиях

$$\frac{-1-\frac{1}{n-1}\sqrt{n(n+2)}}{2} < S_{0r} < \frac{-1+\frac{1}{n-1}\sqrt{n(n+2)}}{2},$$

$$\frac{-\left(\frac{S_{0r}}{n}+\frac{1}{2n}\right)-\frac{\sqrt{n(n+2)}}{2n(n-1)}}{\frac{4n-1}{4(n-1)^2}-S_{0r}^2-S_{0r}} \le S_{pr} \le \frac{-\left(\frac{S_{0r}}{n}+\frac{1}{2n}\right)+\frac{\sqrt{n(n+2)}}{2n(n-1)}}{\frac{4n-1}{4(n-1)^2}-S_{0r}^2-S_{0r}}.$$

Выбрав в (3) знак «+» или «–» перед радикалом, получим дальние и ближние формы линз, которые, как известно из [1], не равноценны в отношении аберраций.

Форма линзы с минимальной величиной астигматизма определяется по выражению

$$\Phi_{\min} = \frac{2n(n-1)}{n+2}\left[\frac{n+1}{nS_{pr}}+\frac{2n+1}{2(n-1)}+\frac{2(n+1)}{n}S_{0r}\right]-1; \quad (4)$$

3) для линз, корригируемых на минимум дисторсии

$$\Phi_{\min} = \frac{n(n-1)}{n+2}\left[\frac{3(n+1)}{nS_{pr}}+\frac{2n+1}{n-1}+\frac{4(n+1)}{n}S_{0r}\right]-1; \quad (5)$$

4) для линз, корригируемых на астигматизм и кривизну изображения, форма определяется выражениями (3) и (4), а параметр $\overline{d}$, обеспечивающий заданное значение кривизны в области аберраций третьего порядка, находят по формуле

$$\overline{d} = \frac{4\phi}{\frac{\phi^2(1-\Phi^2)}{nS_{\mathrm{IV}}-\phi}+(nS_{\mathrm{IV}}+\phi)} \quad (6)$$

где S_{iv} – четвертая сумма Зейделя. При $S_{iv}=0$, как следует из (6), $\overline{d}=\frac{4}{\Phi^2}$.

Значения параметров, найденных по формулам (1) – (6), в области реальных аберраций уточняются при помощи модифицированного метода Ньютона. При этом аппроксимация поведения функции в окрестности исходной точки полинома второй степени

$$f(\Phi) \cong f_0 + f'\Delta\Phi + \tfrac{1}{2}f''\Delta\Phi^2$$

позволяет найти решение этого уравнения:

$$\Delta\Phi = \frac{4\delta\Phi f_0}{(f^{(1)}-f^{(2)})+\sqrt{(f^{(1)}-f^{(2)})-8(f^{(1)}+f^{(2)}-2f_0)f_0}},$$

либо его минимум

$$\Delta\Phi = \frac{\delta\Phi(f^{(1)}-f^{(2)})}{2(f^{(1)}+f^{(2)}-2f_0)},$$

где $f_0, f^{(1)}, f^{(2)}$ – значения функции, вычисленные при следующих значениях параметров: Ф, Ф+δФ, Ф–δФ.

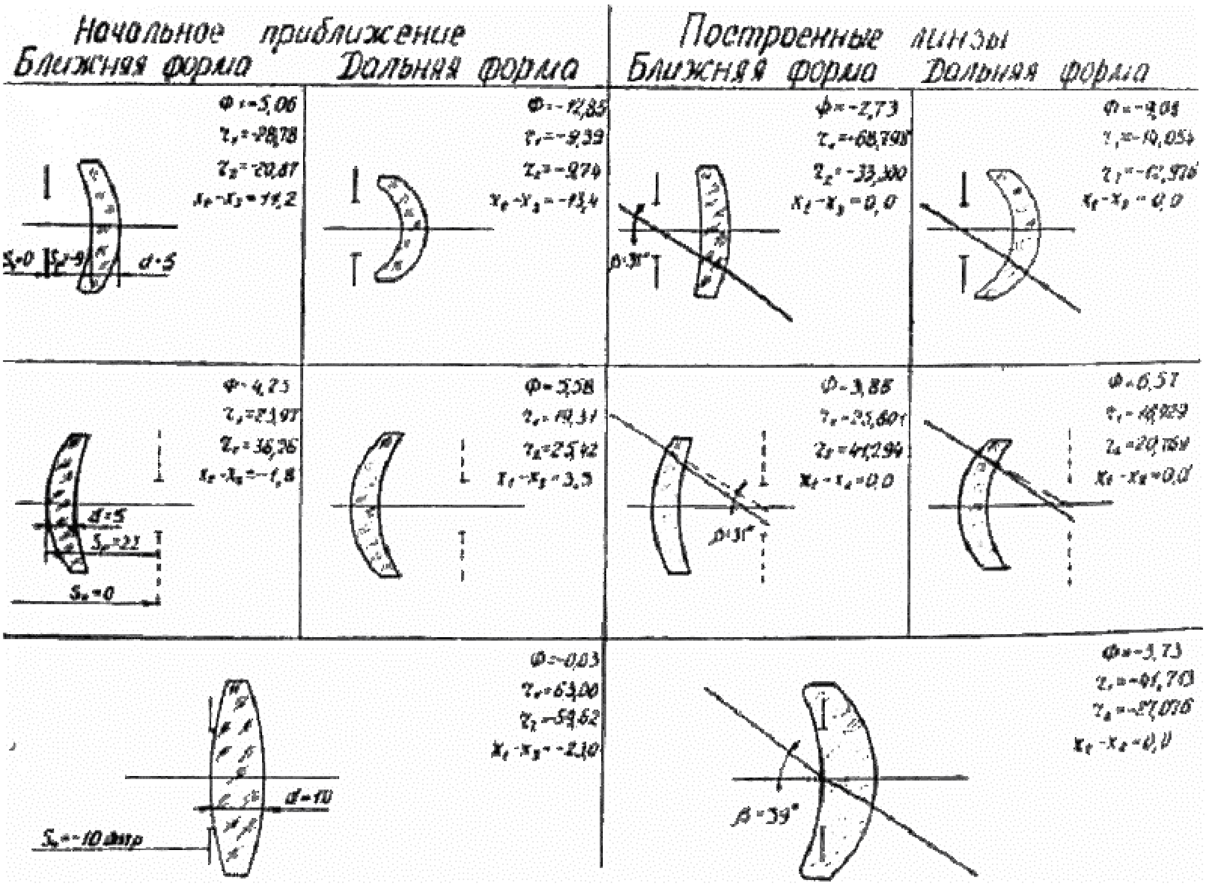

Рис. 1. Линзы, корригируемые на астигматизм($n = 1.6126$, $f_0' = 100$*)*

Результаты испытания разработанного метода представлены на рис. 1, 2.

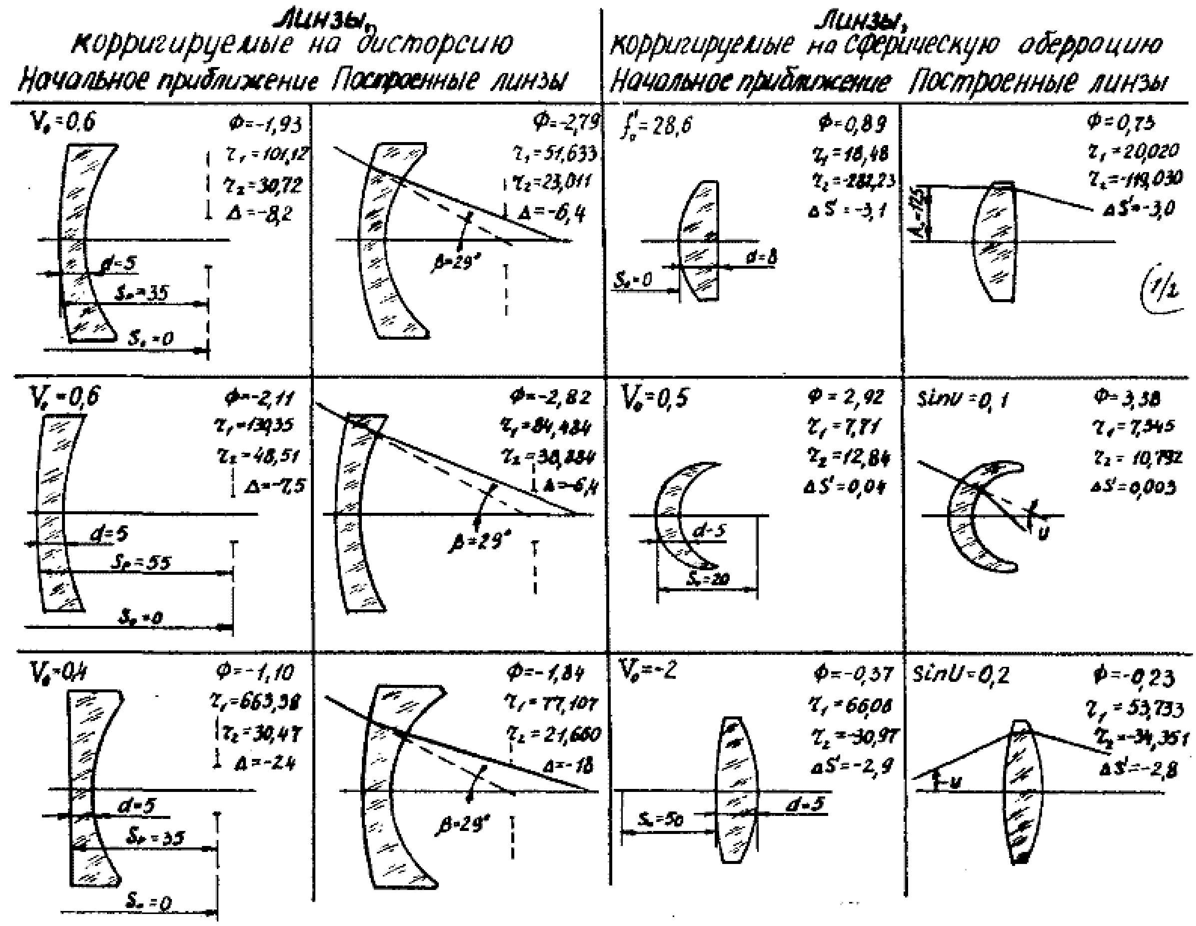

Рис. 2. Линзы, корригируемые на дисторсию и на сферическую аберрацию

$(n = 1.6126)$

ЛИТЕРАТУРА

1. Русинов М. М. Техническая оптика. М. – Л., Машгиз, 1961.
2. Русинов М. М. О классификации фотографических объективов. – «Расчет и конструирование оптических систем», Труды ЛИТМО, вып. 75, Л., 1974, с. 5.
3. Родионов С. А. Анализ характеристик оптических систем и методов их расчета на ЭВМ. Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., ЛИТМО. 1971.
4. Родионов С. А. Типы оптических систем и конкретизация обобщенных характеристик. – «Расчет и конструирование оптических систем». Труды ЛИТМО, вып. 75, Л., 1974, с. 46.