

## КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ АДАПТИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

*Артюхина Н.К., Марчик В.А.*

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Представлены программы для расчета и анализа оптических систем любого класса. Наиболее эффективно объединение программ в комплекс с общей системой математических моделей. Характерной чертой программ является унификация обмена информацией между этими программами и программными комплексами *Oral* и *Zemax*. (E-mail: art4913@rambler.ru)*

**Ключевые слова:** оптическая система, модель, прибор, допустимые отклонения.

### Введение

В оптическом приборостроении автоматизация проектирования оптических систем, обладающих предельными значениями числовых апертур, линейными или угловыми полями при значительных требованиях к качеству изображения, является одним из основных факторов сокращения сроков новых разработок.

Проектирование прибора начинается с поиска научно-технической идеи, которая закладывается в принципиальную оптическую систему. На этом этапе работы создаются конкурентоспособные и патенто-чистые приборы, не уступающие по своим характеристикам лучшим мировым образцам. Расчет оптической системы, в сущности, представляет собой точное математическое моделирование работы прибора, ревизию первоначально заложенной идеи, в результате чего она может быть либо подтверждена, либо опровергнута. Расширение области применения оптико-электронных приборов, создание новых оптических систем, решающих разнообразные сложные научно-технические задачи, налагает определенные требования на программные оптотехнические комплексы. В настоящее время компьютерное моделирование оптических систем рассматривается как один из этапов технологии информационной поддержки полного жизненного цикла оптических изделий. На рынке программных коммерческих продуктов представлен ряд пакетов прикладных программ для проектирования (ППП) и анализа оптических систем.

Лидирующее положение занимают ППП *Oral* [1], *Zemax*, *Code V* [2]. Программные комплексы, обладая большими функциональными возможностями, не охватывают весь спектр задач, решаемых оптиком-расчетчиком в процессе производства. В оптических отделах и лабораториях оптиками-программистами разрабатываются отдельные самостоятельные приложения для решения частных вопросов.

Цель настоящей работы – создание библиотеки программ, предназначенных для моделирования и технологической адаптации оптических систем любого класса и содержащей компьютерные программы, учитывающие специфику конструкторских разработок, особенности технологических процессов изготовления оптических деталей и сборки готовых узлов и приборов и выполняющие функции, которые не встроены в конфигурации ППП *Oral* и *Zemax*.

Структура комплекса программ состоит из следующих модулей:

- расчет допусков на конструктивные элементы центрированных оптических систем, на децентрировку поверхностей и компонентов;
- расчет зависимостей между изменениями аберраций;
- расчет и корректировка нелинейного закона движения компонентов панкратической системы;
- программа для интеграции ППП *Oral* и *Zemax* (OZ);
- расчет параксиальных характеристик, автоколлимационных точек оптической системы и ее отдельных компонентов, бликов 2-го по-

рядка, вывода эскизов линз и оптической схемы (оптический выпуск);

- расчет коэффициентов спектрального и интегрального пропускания оптической системы;

- расчет параметров оптической системы в зависимости от изменения температуры и давления (терморасстраиваемость);

- пересчет показателей преломления стекол на плавки (плавка).

### Программа расчета допусков

Данный модуль предназначен для определения допусков на случайные технологические погрешности систем оптических приборов любого класса со сферическими и плоскими поверхностями [3].

В алгоритме компьютерной программы исходными данными для расчета являются [4]:

- ряд независимых функций, оказывающих наиболее сильное влияние на качество изображения системы; для них вычисляются частные производные от функций по параметрам  $\frac{\partial \Phi_j}{\partial p_i}$ ;

- допустимые отклонения независимых функций, вызывающие снижение качества изображения системы на заданную величину.

Указанные данные считаются заданными; они должны соответствовать требованиям технического задания на оптический прибор, а также назначению и степени аберрационной коррекции оптической системы.

Первый этап моделирования технологически адаптированной системы включает расчет допусков на 4 группы конструктивных параметров:

- радиусы пробных стекол;
- отклонения показателей преломления оптических сред;
- отклонения толщин оптических деталей (линз) и воздушных промежутков;
- подгонку под пробное стекло.

Алгоритм расчета допусков построен следующим образом.

1. Определение доверительных интервалов изменений монохроматических аберраций и параксиальных характеристик оптической системы при самых жестких технологически выполнимых допусках  $\delta p_{нми}$ .

2. Определение функции, наиболее чувствительной к изменениям конструктивных

параметров и, следовательно, оказывающей наиболее сильное влияние на снижение качества изображения оптической системы, которая выбирается из ряда функций  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k$  по наибольшему значению отношения величины доверительного интервала изменения независимой функции к ее заданному допустимому отклонению при выполнении технологических допусков.

3. Допуски на указанные группы параметров по заданному допустимому отклонению конкретной функции рассчитывают по формуле:

$$\Delta p_{ij} = \frac{\delta p_{нмиj}}{\sqrt[3]{\left(\frac{\partial \Phi_k}{\partial p_{ij}}\right)^2}} \frac{\delta \Phi_k}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\left(\frac{\partial \Phi_k}{\partial p_{ij}} \delta p_{нмиj}\right)^2}}}. \quad (1)$$

4. Далее производят контроль проверки соответствия расчетных значений допусков (1) условию:

$$\Delta p_{ij} < \delta p_{нбij}, \quad (2)$$

где  $\delta p_{нбij}$  – значение допуска, определяемое «верхней» технологической границей. Если неравенство (2) не выполняется, то значению  $\Delta p_{ij}$ , вышедшему за «верхнюю» технологическую границу, присваивается значение, равное  $\delta p_{нбij}$ , а затем вычисляется допустимое отклонение функции  $\Phi_k$  для оставшихся параметров:

$$\delta \Phi_{Кост} = \sqrt{\delta \Phi_k^2 - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^t \left(\frac{\partial \Phi_k}{\partial p_{ij}} \delta p_{нбij}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $\delta \Phi_k$  – заданное допустимое отклонение функции  $\Phi_k$ ;  $t$  – число параметров, вышедших за «верхнюю» технологическую границу.

5. Расчет допусков повторяется вновь для нового отклонения функции  $\delta \Phi_{Кост}$ .

6. Следующий этап – проверка выполнения неравенства:

$$\Delta p_{ij} < \delta p_{нмиj}, \quad (4)$$

где  $\delta p_{nmij}$  – самый жесткий допуск, значение которого определяется «нижней» технологической границей. Если неравенство (4) не выполняется для каких-нибудь допусков  $\Delta p_{ij}$ , то значениям допусков, вышедшим за «нижнюю» технологическую границу, присваивается величина  $\delta p_{nmij}$ .

Отметим, что когда заданная величина  $\delta\Phi_k$  больше значения доверительного интервала изменения функции  $\Phi_k$ , рассчитанного при самых жестких допусках на 4 группы конструктивных параметров, то оптическая система может быть технологически адаптирована без дополнительных пересчетов на радиусы пробных стекол и на плавки при выполнении условия (4).

7. Далее вычисляют величину допустимого отклонения функции  $\delta\Phi_{\text{Кост}}$  для оставшихся параметров, после чего расчет допусков повторяется.

Описанная последовательность действий приводит к тому, что значения допусков на 4 группы параметров оказываются заключенными в соответствующие технологические границы.

Модуль позволяет дополнительно рассчитывать допустимые децентрировки на отдельные поверхности линз и компоненты в целом, а также выбирать компенсационные элементы с возможностью дополнительного поперечного смещения их в процессе сборки оптической системы.

Программа может использоваться для расчета допусков для систем оптических приборов различного назначения. Изготовление ряда объективов подтвердило правильность назначенных допусков по данной методике.

### Программа расчета зависимостей между изменениями аберраций

Модуль позволяет установить связи между изменениями функций (заданных аберраций и параксиальных характеристик), может быть полезен при оценке возможности компенсации аберраций в процессе определения допусков на случайные технологические погрешности оптических систем любого класса со сферическими и плоскими поверхностями и является допол-

нительной опцией программы расчета допусков.

Математически задача сводится к выяснению существования линейной зависимости между приращениями функций  $\Delta\Phi_j$  и  $\Delta\Phi_i$ , а именно

$$k_{ji} = \frac{\Delta\Phi_j}{\Delta\Phi_i}, \quad (5)$$

где  $\Delta\Phi_j$  и  $\Delta\Phi_i$  – приращения аберраций оптической системы, либо ее параксиальных характеристик (фокусного расстояния, увеличения, заднего отрезка и др.).

Программа генерирует таблицы, в которых указаны функции, коэффициенты связи и относительные погрешности коэффициентов. Относительная погрешность коэффициента связи определяется формулой  $\sqrt{1 - \rho_{ji}^2}$ , где

$$\rho_{ji} = \frac{\sum_{i=1}^{i=t} \delta\Phi_{ji} \delta\Phi_{ii}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^{i=t} \delta\Phi_{ji}^2)(\sum_{i=1}^{i=t} \delta\Phi_{ii}^2)}}, \quad (6)$$

$\delta\Phi_{ji}$  – приращение функции, вызванное приращением  $i$ -го параметра.

Подобный анализ наличия связей позволяет существенно расширять допуски на отклонения конструктивных параметров от номинальных значений.

### Программа расчета и корректировки нелинейного закона движения компонентов панкратической системы

Программа позволяет вычислять значения расстояний между компонентами в зависимости от фокусного расстояния (увеличения) всей оптической системы; графическая интерпретация расчетов наглядно отображает характер движения компонентов и определяет необходимость изменения оптических сил либо увеличения числа подвижных компонентов, если выявляются трудности реализации закона движения компонентов.

Результаты параметрических расчетов величин расстояний между компонентами в зависимости положений используются на этапе конструкторского проектирования (служат исходными данными для вычисления профиля кулачков или реализации закона движения с помощью шаговых двигателей).

Расстояния между компонентами удобно использовать в качестве параметров для оптимизации абберационных характеристик панкратических систем. Отметим, что при оптимизации абберационных характеристик оптических систем, особенно с большим перепадом фокусных расстояний или большой светосилы, не всегда удается сохранить постоянство плоскости изображения (установки) для всех положений подвижных компонентов. В этом случае целесообразно вводить корректировку нелинейного закона движения подвижного компонента, учитывающую требования к изменению (сдвигу) плоскости изображения от номинального положения для различных положений компонентов. Такая возможность реализована в программе KorPanZD.

### Программа OZ

Моделирование оптических систем на базе параллельно используемых программных комплексов Oral и Zemax отвечает современным тенденциям развития компьютерного проектирования оптики.

Одним из наиболее трудоемких и длительных этапов является ввод конструктивных данных оптической системы с несферическими поверхностями. Возникает необходимость в автоматизации этого процесса.

Программа OZ разработана на основе программы «Оптический выпуск» и предназначена для преобразования файлов исходных данных ППП Oral в файлы формата zmx для последующего использования в пакете программ Zemax (ППП Zemax). Модуль позволяет оперативно генерировать файлы центрированных оптических систем со сферическими и несферическими поверхностями.

### Программа «Оптический выпуск»

Данный компьютерный модуль, кроме расчетов параксиальных характеристик, автоколлимационных точек всей оптической

симости от фокусного расстояния (увеличения) оптической системы для требуемого количества элементов (импортируемой из ППП Oral) и ее отдельных компонентов, бликов 2-го порядка, вывода эскизов линз и оптической схемы, содержит дополнительный блок считывания конструктивных данных оптической системы из ППП Zemax для выполнения всех последующих этапов расчета.

### Программа «Расчет коэффициентов спектрального и интегрального пропускания»

Программа предназначена для расчета коэффициентов спектрального и интегрального пропускания центрированной оптической системы с учетом просветляющих, светоделительных, зеркальных и сложных интерференционных покрытий. В ней используется алгоритм, созданный на основе формул светотехнического (энергетического) расчета оптической системы [5].

### Программа «Терморасстраиваемость»

Модуль предназначен для расчета конструктивных параметров оптической системы: радиусов, толщин линз, осевых расстояний между оптическими деталями, показателей преломления стекол; а также параксиальных характеристик – вершинных фокальных отрезков, фокусных расстояний в зависимости от изменения температуры и давления. Алгоритм программы основан на математических соотношениях и выводах теории термооптических aberrаций [6].

### Программа «Плавка»

В программе использован алгоритм расчета показателей преломления оптических материалов, использующий формулы, приведенные в работе [7].

В процессе создания компьютерного модуля «Плавка» учтено, что в каталогах предприятий – производителей оптических материалов (стекол) величина показателя преломления представляет собой среднее значение для большого числа «плавков» или партий стекол. Величины показателя преломления у стекол, полученных при разных «плавках», могут несколько отличаться от значений по каталогу или номинальных величин. Отклонения обычно невели-

ки, но разница номинальных и действительных величин показателя преломления может быть весьма существенной для некоторых оптических систем.

### Выводы

Разработаны компьютерные программы, охватывающие широкий круг инженерных задач (от проектирования оптической системы до выпуска технологической документации), решаемых на предприятиях оптической отрасли, и выполняющие функции, не встроенные в конфигурации ППП Орал и Zemax. Программы служат для расчета и анализа оптических систем любого класса и объединены в комплекс с общей системой математических моделей.

Характерной чертой представленного комплекса моделирования технологически адаптированных оптических систем является унификация обмена информацией между разработанными программами и программными комплексами Орал и Zemax.

Созданная библиотека программ позволяет значительно расширить возможности пользователей и представляет интерес для специалистов оптической отрасли, занимающихся раз-

работкой и моделированием современных оптических и оптико-электронных приборов.

### Список использованных источников

1. *Артюхина, Н.К.* Компьютерное проектирование оптических систем : учеб-метод. пособие : в 2 ч. / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик; Мино образования Респ. Беларусь; БНТУ. – Минск, 2007. – Ч. 1: Анализ центрированных оптических систем. – 105 с.
2. *The Photonics Handbook, Book3, 52nd International Edition, A. Laurin Publication, 2006.*
3. *Артюхина, Н.К.* Параметрическая оценка чувствительности оптической системы к погрешностям изготовления / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 1 – С. 25–29.
4. *Зверев, В.А.* Обобщенная параметрическая модель оптической системы и ее анализ / В.А. Зверев, И.Н. Тимошук // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 9. – С. 29–33.
5. *Born, M.* Principals of Optics / M. Born, E. Wolf. – 7-th edition. – London: Cambridge University, 1999. – 561 p.
6. *Волосов, Д.С.* Фотографическая оптика / Д.С. Волосов. – М. : Искусство, 1971. – 670 с.
7. *Слюсарев, Г.Г.* Расчет оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л. : Машиностроение, 1975. – С. 614.

---

Artioukhina N.K., Marchyk V.A.

### Software for simulation of technological adaptation of the optical instruments systems

Programs for calculation and analysis of optical systems of any class are provides. The most effective was to combine the programs into a complex with the general system of mathematical models. A characteristic feature is to unify the exchange of information between these programs and software systems Орал and Zemax. (E-mail: art4913@rambler.ru)

**Key words:** system, model, instrument, tolerance.

*Поступила в редакцию 27.02.2012.*