

УДК 535.317; 681.7

Академик А. П. ШКАДАРЕВИЧ<sup>1</sup>, Н. К. АРТЮХИНА<sup>2</sup>

## О КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ОСНОВАХ ПРОЦЕДУРЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

<sup>1</sup>Научно-технический центр «Лазеры в экологии, медицине и технологии» БелОМО, Минск, Беларусь  
shkad@lemt.by

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь  
art49@mail.ru

Представлены классификационные основы синтеза оптических систем: классификация оптических схем, модулей, элементов; их типы; каталогизация оптических систем; методика формализации знаний с помощью таблиц решений; индекс сложности оптической схемы и некоторые эвристические правила формализации перехода от требований технического задания к выбору элементной базы оптической системы.

*Ключевые слова:* оплотехника, зеркальные системы, коррекция аберраций, расчет оптических схем, объектив, сводка основных параметров системы, качество изображения.

A. P. SHKADAREVICH<sup>1</sup>, N. K. ARTIOUKHINA<sup>2</sup>

## CLASSIFICATION BASES OF THE STRUCTURAL SYNTHESIS OF OPTICAL SYSTEMS

<sup>1</sup>Scientific-technical center «LEMT», BelOMO, Minsk, Belarus  
shkad@lemt.by

<sup>2</sup>Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus  
art49@mail.ru

Classification bases of the synthesis of optical systems are presented: a classification of optical schemes, modules, elements; their types; cataloguing optical systems; a method of formalization of knowledge by means of decision tables; an index of complexity of an optical scheme, and some heuristic rules of formalization of transition from requirements of a preliminary specification to a choice of the element base of an optical system.

*Keywords:* calculation optics, mirror systems, aberration correction, optical design, the objective, system summary graphic, image quality.

**Введение.** Беларусь относится к числу тех немногих стран, где проводятся работы по всему циклу создания оптического прибора, включая расчеты оптических систем (ОС) [1]. В настоящее время произошли большие изменения в методах расчета ОС, связанные, в основном, с компьютеризацией проектирования. Программные комплексы по расчету оптики, обладая большими функциональными возможностями, не охватывают весь спектр задач, возникающих в процессе производства. Этапы, требующие творческого подхода, остаются прерогативой оптика-расчетчика ОС.

Удовлетворение технических требований, предъявляемых к новым разработкам, обеспечивается различными принципиальными схемами, что свидетельствует о существовании нескольких возможных решений. Окончательный выбор базовой схемы ОС предполагает более детальный сравнительный анализ по светосиле, размеру полезного поля изображения, контрасту, массогабаритным характеристикам, точностным требованиям к оптическим поверхностям и их взаимному расположению; имеет определяющее значение для успешной реализации поставленной задачи. В настоящее время проблема формализации процесса проектирования ОС, основой

которой являются вопросы классификации и составления каталогов в связи с большими архивами рассчитанных ОС, очень актуальна.

Цель работы – установить классификационный подход к выбору исходной системы (стартовой точки проектирования); определить некоторые эвристические правила формализации перехода от требований технического задания к выбору элементной базы оптической системы.

Проектирование ОС сочетает формализованные процедуры расчетного характера (расчет хода лучей и др.) и неформализованные (выбор поверхностей, оптических элементов, отдельных характеристик, согласование требований к отдельным элементам). Моделирование оптики разделяют на три основных процедуры: синтез, анализ и оптимизация.

**Основная часть.** Процедура синтеза ОС (формирование конструкционной модели) использует основные положения теории композиции, под которой можно понимать широкий подход к созданию той или иной системы, допускающий варианты взаимного перемещения элементов в оптической схеме [2]. В процессе выполнения процедуры возможны любые методы генерирования первоначальных значений конструктивных параметров (радиусов оптических поверхностей  $r$ , осевых расстояний  $d$ , показателей преломления оптических сред  $n$ ) по заданным оптическим характеристикам (фокусному расстоянию  $f'$ , масштабу изображения  $\beta$ , суммам Зейделя и т. д.).

Процедуру можно разделить на два уровня: структурный и параметрический синтез. Структурный синтез, в результате которого определяется количество и вид компонентов, составляющих ОС, является в настоящее время весьма эвристической операцией. В процессе параметрического синтеза определяются конкретные числовые значения параметров уже созданной структуры. Параметрический синтез и последующая оптимизация параметров ОС могут выполняться практически в любой современной программной среде типа Opal, Zemax, Code V и др. Например, в ПП Synopsys существует специальная опция «solves», которая по заданным типам поверхностей, толщине линз, расстояниям между ними и оптическим материалам рассчитывает недостающие параметры. Программы оптимизации способны привести заданную оптическую систему к ближайшей оптимальной конфигурации с помощью минимизации определенной оценочной функции. Программные среды представляют пользователям лишь некоторый ограниченный набор возможностей поиска стартовых точек, например, каталоги готовой продукции [3], патентная литература [4]. Для оптической системы любой степени сложности существует множество локальных минимумов оценочной функции; удачный выбор исходной системы на ранних этапах разработки в значительной мере сокращает общее время проектирования.

Предлагается оптимальная структура построения оптической схемы, начиная с одного базового элемента, а затем ее усложнения путем добавления необходимых дополнительных коррекционных элементов. Данный подход ограничивает появление в оптической схеме «лишних» элементов, так как введение в схему очередного элемента обуславливается его функциональным назначением. Важным преимуществом предлагаемого подхода является возможность рассмотрения значительного количества вариантов схем. Задача выбора стартовой точки проектирования решается в виде структурной схемы, представленной как последовательность оптических элементов с указанием их типа и взаимного расположения, которая может быть названа «формулой структурного синтеза объектива» [5]. Формула структурного синтеза несет в себе информацию о количестве, взаимном расположении и типах поверхностей оптических элементов. В качестве элементной базы выбираются оптические элементы с известными свойствами и определенными aberrациями. Задача моделирования оптики решена, если получены формулы структурного синтеза, пригодные для дальнейших манипуляций с ними: определения параметров ОС (параметрический синтез), введения найденных параметров в специализированную программную среду, результатом работы которой и будет оптическая схема, удовлетворяющая требованиям технического задания.

Процедура синтеза начинается с построения классификации оптических систем. Существует множество различных видов классификаций. Наиболее общая компьютерная классификация выполнена по относительному расположению предмета и изображения ОС [6]: предмету (изображению), находящемуся на конечном расстоянии от ОС, присваивается шифр «1», в случае

бесконечности – шифр «0». Она включает четыре класса систем: микроскопы «I–0»; телескопические системы «0–0»; фотообъективы «0–I»; проекционные системы «I–I». При более подробном рассмотрении в каждом из этих классов обнаруживается множество подклассов, которые определяются уточненными классификациями (класс фотообъективов «0–I» можно разделить на  $3^7 = 2187$  подклассов и т. д.).

ОС (объекты интеллектуальной собственности) классифицируются в соответствии с принципами, принятыми в патентной литературе. Анализ патентной документации, которая представляет собой исключительно ценный источник информации, необходим для определения уровня техники и новизны создаваемой ОС, хотя полная информация, представляемая в патентах, избыточна для конструкторов, специализирующихся на расчете ОС.

Кроме того, для оценки каждого класса ОС целесообразно применять два вида характеристик: *технические*, которые оперируют с конкретными значениями физических величин и *обобщенные*, необходимые для использования в компьютерном моделировании в различных программных средах.

Классификация схем и модулей необходима для создания базы данных, т. е. каталогизации ОС. Под оптическим модулем будем понимать исторически сложившиеся схемные решения, которые во многих случаях получили имена собственные, обычно по имени изобретателя или числу компонентов. Модули могут использоваться как самостоятельно, так и в составе более сложной оптической схемы. В работе [7] рассмотрен аспект создания каталога (библиотеки) оптических модулей различных классов, встроенного в конфигурацию компьютерного пакета по расчету оптики Oral; предложен алгоритм и установлен путь в архив с проверкой параксиальных характеристик. Такой каталог позволяет наилучшим образом выбирать базовые схемы при минимальном времени на разработку.

В работе [8] представлены разработанные каталоги, содержащие информацию о всех возможных зеркальных схемах в виде таблиц и графиков. Составленные параметрические таблицы позволяют одновременно проанализировать характеристики зеркальных систем, выявить их предельные возможности и сформулировать рекомендации по выбору оптимального исходного варианта для решения конкретной задачи. Таблицы решений позволяют упростить процесс формализации знаний, сведя его к нескольким типовым шагам. К примеру, в работе [9] для описания каталога двухзеркальных систем предложен принцип их построения по ходу 1-го параксиального луча, позволяющий найти все возможные конструкции с действительным или мнимым эквивалентным фокусом  $F'_{\text{эkv}}$ .

Линзовые и зеркальные элементы предлагается классифицировать по различным оптическим параметрам: значению оптической силы, известным аберрационным свойствам, форме поверхности, типу асферизации поверхностей, функциональному назначению и т. д. Накопленный опыт проектирования ОС позволяет выделять ряд малоабберационных оптических элементов и формулировать условия их применения.

Дальнейшее исследование и классификацию оптических элементов предлагается проводить в области схмотехники ОС (установление кодировки элементов и модулей, описания схематических изображений и т. д.). Примеры некоторых кодировок зеркальных систем приведены в [10].

Анализ и формализация вышеприведенного материала позволили установить соответствующие *технические аспекты классификации*:

- классификация оптических систем, модулей и элементов; их типы;
- каталогизация оптических модулей ОС;
- методика формализации знаний с помощью таблиц решений;
- классификационные параметры ОС; индекс сложности оптической схемы.

Важной характеристикой, определяющей выбор исходных схем ОС, является индекс сложности ( $G$ ), который описывается алгебраической суммой чисел, представляющих собой обобщенные характеристики (классификационные параметры). К примеру, для зеркальных систем имеем сумму параметров ( $A$  – светосила системы,  $Y$  – поле зрения,  $F$  – фокусное расстояние,  $Q$  – качество изображения (степень аберрационной коррекции),  $E$  – центральное экранирование):

$$G = A + Y + F + Q + E.$$

Обобщенные характеристики определяют соответствующие группы условий (по оптическим характеристикам, назначению ОС, ее конструктивным особенностям). Каждое из перечисленных условий разделим на три диапазона значений и обозначим индексами «0», «1» и «2», которые можно использовать в таблице решений.

Индекс сложности может изменяться в пределах от 0 до 10, при этом «0» соответствует самой простой оптической схеме, а «10» – максимально сложной. Исходя из накопленного опыта, будем считать зеркальную ОС сложной, если индекс больше 5. Для реализации сложных оптических систем обычно требуется создание принципиально нового схемного решения, которое в дальнейшем может быть запатентовано. По совокупности индексов диапазонов в соответствии со значениями каждой из характеристик устанавливают возможную степень сложности в определенных пределах или коэффициенты добротности.

Приведем классификацию зеркальных систем по типу схемных решений и оптическим параметрам с учетом индексов сложности (таблица).

**Классификация зеркальных ОС по обобщенным характеристикам**

Схемное решение	Степень затенения апертуры, $E$	Фокусное расстояние $f'$ (м), $F$	Относительное отверстие $D : f', A$	Угловое поле $2\omega, Y$
«0» Центрированная схема	«0» С центральным экранированием	«0» Короткофокусные $f' < 0,7$	«0» С малой светосилой $D : f' < 1 : 8$	«0» Узкопольные $2\omega < 30'$
«1» Условно децентрированная схема	«1» С малым центральным экранированием (<5 %)	«1» Длиннофокусные $0,7 < f' < 5$	«1» Светосильные $1 : 8 < D : f' < 1 : 2$	«1» Нормальные $30' < 2\omega < 5^\circ$
«2» Децентрированная схема	«2» Без центрального экранирования	«2» Осободлиннофокусные $f' > 5$	«2» Особосветосильные $D : f' > 1 : 2$	«2» Широко угловые $2\omega > 5^\circ$

**Заключение.** В сообщении рассмотрена структура классификационных подходов для анализа характеристик, предельных возможностей и формулировки рекомендаций по выбору базового модуля, который проводится на основе эвристического опыта с учетом оптических характеристик, конструктивных условий, назначения, коррекционных возможностей и последующей оптимизации. Установлен классификационный подход к выбору стартовой точки проектирования.

Рассмотрены основы структуры построения оптической схемы, ограничивающие появление в оптической схеме «лишних» элементов. Особенностью является возможность начала структуры оптической схемы с установленного базового модуля и последующего ее усложнения путем добавления необходимых дополнительных коррекционных элементов. Определены технические аспекты классификации.

Классификационный подход к каталогам ОС позволит служить одним из основных факторов сокращения сроков новых разработок. Он может использоваться не только отдельными специалистами инженерами-оптиками; большинство оптических компаний рано или поздно приходят к необходимости создания архивов своих разработок и классификации этой информации.

#### Список использованной литературы

1. Современные оптико-электронные комплексы как результат внедрения достижений в области оптики / М. М. Мирошников [и др.] // Оптика XXI век: матер. 6-го Междунар. оптического конгресса, Санкт-Петербург, 18–21 окт. 2010: в 3 т. – СПб., 2010. – Ч. 1. – С. 2–6.
2. Русинов, М. М. Композиция оптических систем / М. М. Русинов. – Л.: Машиностроение, 1989.
3. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Edmund\\_Scientific\\_Corporation](https://en.wikipedia.org/wiki/Edmund_Scientific_Corporation).
4. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dictionary.reference.com/browse/europatent>.
5. Васильев, В. Н. Основы проектирования экспертных систем компоновки объективов / В. Н. Васильев, И. Л. Лившиц, Д. И. Муромцев. – СПб.: «Наука», 2012.

6. *Артюхина, Н. К.* Теория и расчет оптических систем: учеб. пособие / Н. К. Артюхина; Мин-во образования Респ. Беларусь. – Минск: БНТУ, 2004.

7. *Артюхина, Н. К.* Технические аспекты классификации и каталогизации оптических систем / Н. К. Артюхина, В. А. Марчик // Приборостроение 2014: матер. 7-й МНТК, Минск, 19–21 нояб. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2014. – С. 240–242.

8. *Артюхина, Н. К.* Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем / Н. К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2009.

9. *Артюхина, Н. К.* Опотехника двухзеркальных анастигматов / Н. К. Артюхина // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2012. – № 1. – С. 105–111.

10. *Артюхина, Н. К.* Классификация и абберационный анализ зеркальных анастигматов с монолитом из двух зеркал / Н. К. Артюхина // Вестн. НТУУ «КПИ». Сер. Приборостроение. – 2014. – Вып. 47. – С. 44–52.

*Поступило в редакцию 10.08.2015*