

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 535.317

КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПО ВЫБОРУ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

¹⁾Артюхина Н. К., ²⁾Шкадаревич А. П.¹⁾Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь²⁾Научно-производственное унитарное предприятие «Научно-технический центр "ЛЭМТ" БелОМО», Минск, Республика БеларусьE-mail: 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: классификация, каталог, оплотехника, расчет оптических схем, оптимизация, сводка основных параметров системы, качество изображения.

Введение

Республика Беларусь относится к числу тех немногих стран, где ведутся работы по всему циклу создания оптического прибора, включая расчеты оптических систем (ОС). Схемные решения ОС настолько же разнообразны, насколько широка область их применения; им предъявляются все более высокие требования [1, 2]. В настоящее время произошли большие изменения в методах расчета, связанные, в основном, с компьютеризацией проектирования и обработки результатов измерений параметров оптических систем.

Компьютерное моделирование ОС рассматривается как один из этапов технологии информационной поддержки полного цикла производства оптической аппаратуры. Имеется достаточное количество программных продуктов (ПП) для расчета оптики различной степени сложности, лидирующее положение среди которых занимают ППП Opal, Zemax, Code V [3].

Программные комплексы проектирования и анализа ОС, обладая большими функциональными возможностями, не охватывают весь спектр задач, решаемых оптиком-расчетчиком в процессе производства. Только отдельные этапы проектирования в той или иной степени автоматизированы, основные из них: расчет хода лучей, оптимизация, анализ качества изображения и допусков на изготовление. Этапы, требующие творческого подхода: выбор исходной (базовой) схемы ОС – стартовой точки проектирования – и процедуры принятия решений по-прежнему остаются прерогативой оптика-расчетчика. Актуальным вопросом является

создание библиотеки компьютерных программ, предназначенных для моделирования и технологической адаптации оптических систем любого класса, учитывающих специфику конструкторских разработок, особенности технологических процессов изготовления оптических деталей и сборки готовых узлов и приборов и выполняющих функции, которые не встроены в конфигурации известных компьютерных пакетов по расчету ОС.

Одно из направлений в вычислительной оптике – постоянный поиск новых схем с улучшенными характеристиками. Удовлетворение технических требований, предъявляемых к новым разработкам, обеспечивается различными принципиальными схемами, что свидетельствует о существовании нескольких возможных решений. Выбор оптимального варианта предполагает более детальный сравнительный анализ по светосиле, размеру полезного поля изображения, контрасту, массогабаритным характеристикам, точностным требованиям к оптическим поверхностям и их взаимному расположению. Он традиционно осуществляется специалистом-оптиком, который при определении структурной схемы руководствуется, в основном, личным опытом и опытом своих коллег, а также банками патентной и научно-технической информации. В связи с большими архивами рассчитанных оптических систем проблема классификации и составления каталогов очень актуальна.

Многие новые публикации и зарубежные издания в области оплотехники дополняют материалами по классификации и каталогизации ОС [4].

Решение задачи удачного выбора базового модуля с заданной областью оптических характеристик на ранних этапах разработки имеет определяющее значение для успешной реализации проекта и в значительной мере сокращает общее время проектирования.

Цель работы

Цель работы – установить классификационный подход к выбору исходной системы (стартовой точки проектирования ОС); 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.

Процедура синтеза оптических систем

Эта процедура - формирование конструктивной 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 [5].

При выполнении процедуры возможны любые методы генерирования первоначальных значений конструктивных параметров ОС по заданным характеристикам: определение радиусов оптических поверхностей r , осевых расстояний d , показателей преломления оптических сред n , которые обеспечивают требуемые значения фокусного расстояния f' , масштаба изображения β , сумм 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; 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 (уточнение значений конструктивных параметров из условия получения минимальных остаточных аберраций) способны привести заданную ОС к ближайшей оптимальной конфигурации с помощью минимизации определенной оценочной функции, но всегда

существует множество локальных минимумов. Перечисленные выше среды представляют пользователям некоторый ограниченный набор возможностей поиска стартовых точек, например, каталоги готовой продукции [6], патентная литература [7], поэтому удачный выбор исходной системы на первых 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. Предлагаемый подход ограничивает появление в оптической схеме «лишних» элементов, так как введение в схему очередного элемента обуславливается его функциональным назначением. Важным преимуществом данного подхода является возможность рассмотрения значительного количества вариантов схем.

В таком случае решается задача выбора стартовой точки проектирования в виде структурной схемы, представленной как последовательность оптических элементов с указанием их типа и взаимного расположения. Такая последовательность может быть названа «формулой структурного синтеза объекта» [8]. Структурная формула 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 аберрациями. 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.

Технические аспекты классификации оптических систем

Классификация оптических систем и модулей – один из этапов проектирования оптики. Систематизация различных типов и модификаций позволяет проводить достаточно полный и глубокий анализ большого количества на первый взгляд довольно разнообразных схем и моделировать новые.

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.

Существует множество различных видов классификаций ОС. Наиболее общая компьютер-

ная классификация выполнена по относительно-му расположению предмета и изображения оптических систем [9]: предмету или изображению, находящемуся на конечном расстоянии от ОС, присваивается шифр «1», в случае бесконечности – шифр «0». Она включает четыре класса систем: микроскопы «1-0»; телескопические системы «0-0»; фотообъективы «0-1»; проекционные системы «1-1». При более подробном рассмотрении в каждом из этих классов обнаруживается множество подклассов, которые определяются уточненными классификациями (класс фотообъективов «0-1» можно разделить на $3^7=2187$ подклассов и т.д.).

Оптические системы – 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 оптических систем и модулей необходима для создания базы данных, т.е. каталогизации ОС. Каталоги позволяют наилучшим образом выбирать базовые схемы, при этом затрачивается минимальное время на разработку оптики приборов. В каталогах приводится информация в определенной последовательности, общая схема которой выглядит следующим образом: название базовой системы; общее описание и особенности схемы; конструктивные параметры (мм): радиусы кривизны r , осевые расстояния между зеркалами d , световые диаметры и т. д.; оптические характеристики (фокусное расстояние f' , относительное отверстие D/f' , угловое поле зрения 2ω , видимое увеличение Γ); для асферических поверхностей приведены уравнения меридиональной кривой, деформации поверхностей σ , технологические параметры; асферичность, градиент асферичности, световой диаметр, радиус ближайшей сферы; вспомогательные конструктивные данные (задний отрезок системы S' , габариты (компактность): $d = k f'$ и др.); таблицы aberrаций при заданных характеристиках и параметрах (для объективов [мм]: $\Delta S'$, $\Delta y'$ – продольная и поперечная сферическая aberrация, $\Delta Y'$, % – дисторсия, Z_m' , Z_s' – астигматические отрезки; для афокальных систем [дптр, °; ; ']: D' , σ' – сферическая aberrация; $\Delta \omega'$ – дисторсия, L_m , L_s – астигматические отрезки;

η , % – неизопланатизм); графики остаточных aberrаций: поперечные aberrации в меридиональном и сагиттальном сечении, кривизна поля, дисторсия; точечные диаграммы (ТД), диаграммы волнового фронта, графики МТФ (ЧКХ), функции рассеяния; дополнительные данные по виньетированию [10].

Графическая интерпретация полученных характеристик может быть различной. ФРТ изображают в виде карты уровней равной интенсивности, где дополнительно указано число Штреля. МТФ обычно показывают в виде двумерной функции для меридионального и сагиттального сечения. ТД представляет картину точек пересечения лучей, равномерно распределенных по зрачку, с плоскостью изображения, а фокусирующие диаграммы характеризуют изменение ТД в различных плоскостях установки, в частности, в плоскости наилучшей установки. ФРЛ показывает распределение интенсивности в изображении бесконечно длинной линии в меридиональном или сагиттальном сечении. Вычисление всех характеристик в геометрическом приближении основано на определении поперечных aberrаций для большого количества точек.

В зеркальных и зеркально-линзовых системах проводят поиск рабочих зон с учетом «загромождения» зеркальными поверхностями пучков лучей, по которым можно судить о степени влияния экранирования и виньетирования на качество изображения.

В работе [11] рассмотрен технический аспект создания каталога (библиотеки) оптических модулей различных классов, встроенного в конфигурацию компьютерного пакета по расчету оптики Opal. 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 [10] 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 [12] 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 $F_{\text{экв}}'$.

Линзовые и зеркальные элементы предлагается классифицировать по различным оптическим параметрам: значению оптической силы, известным aberrационным свойствам, форме поверхности, типу асферизации поверхностей, функцио-

нальному назначению и т.д. Для классификации по функциональному назначению целесообразно выделять такие типы оптических элементов как базовые, коррекционные, светосильные, широкоугольные. Накопленный опыт проектирования ОС позволяет выделить ряд малоабберационных оптических элементов и сформулировать условия их применения для решения поставленной задачи.

Дальнейшее исследование и классификацию оптических элементов предлагается проводить в области схмотехники ОС (установление кодировки элементов и модулей, описания схематических изображений и т.д.).

Анализ и формализация вышеприведенного материала позволила 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.

Классификационные параметры

Важной характеристикой, определяющей выбор исходных схем ОС, является индекс сложно-

сти (G), который описывается алгебраической суммой чисел, представляющих собой обобщенные характеристики (параметры классификации).

К примеру, для зеркальных систем имеем сумму:

$$G = A + Y + F + L + Q + E,$$

где обобщенные характеристики: A – светосила системы, Y – угловое поле, F – фокусное расстояние, L – хроматический диапазон, Q – качество изображения (степень абберационной коррекции), S – задний фокальный отрезок, D – положение входного зрачка, E – центральное экранирование. Определяют соответствующие группы условий: по оптическим характеристикам (параметры J , W , F), по назначению (L , Q) и по конструктивным особенностям (S , D). Каждое из перечисленных условий разделим на три диапазона значений и обозначим индексами «0», «1» и «2», которые можно использовать в таблице решений.

Предложим классификацию зеркальных систем по типу схемных решений и оптическим параметрам с учетом индекса сложности, используя таблицу из работы [10, с. 88].

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 2ω Y
«0» Центрированная схема	«0» С центральным экранированием	«0» Коротко-фокусные $f' < 0,7$	«0» С малой светосилой $D:f' < 1:8$	«0» Узкопольные $2\omega < 30'$
«1» Условно децентрированная схема	«1» С малым центральным экранированием (< 5%)	«1» Длинно-фокусные $0,7 < f' < 5$	«1» Светосильные $1:8 < D:f' < 1:2$	«1» Нормальные $30' < 2\omega < 5^\circ$
«2» Децентрированная схема	«2» Без центрального экранирования	«2» Особо длинно-фокусные $f' > 5$	«2» Особо светосильные $D:f' > 1:2$	«2» Широкоугольные $2\omega > 5^\circ$

Индекс сложности может изменяться в пределах от 0 до 8, при этом «0» соответствует самой простой оптической схеме, а «8» – максимально сложной. Исходя из накопленного опыта *практических знаний оптиков-расчетчиков*, ОС система считается 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 сте-

пень сложности в определенных пределах или коэффициенты добротности.

Выводы

1. Предложен классификационный подход к выбору стартовой точки проектирования. Рассмотрены основы структуры построения оптической схемы, ограничивающие появление в оптической схеме «лишних» элементов. Особенностью предлагаемого подхода является возможность начать оптическую схему с одного базового элемента, а затем осуществлять ее усложнение, добавляя необходимые дополнительные элементы.

2. Установлена структура класифікаційних підходів для аналізу характеристик, предельних можливостей і формулювання рекомендацій по вибору базового модуля, який проводиться на основі евристичного досвіду з урахуванням оптичних характеристик, конструктивних умов, призначення, корекційних можливостей і наступної оптимізації.
3. Визначені технічні аспекти класифікації: класифікація оптичних систем, модулів і елементів, їх типи; каталогізація оптичних модулів ОС; методика формалізації знань з допомогою таблиць рішень; класифікаційні параметри ОС; індекс складності оптичної схеми і деякі евристичні правила формалізації переходу від вимог технічного завдання до вибору елементної бази оптичної системи.
4. Класифікаційний підхід до каталогів ОС дозволить служити одним з основних факторів скорочення термінів нових розробок. Він може використовуватися не тільки окремими спеціалістами інженерами-оптиками; більшість оптичних компаній рано або пізно приходять до необхідності створення архівів своїх розробок і класифікації цієї інформації.
5. В даний час не існує сучасної комп'ютерної програмної реалізації запропонованих підходів, тому формалізація процесу проектування ОС, основами якої є питання класифікації і каталогізації в зв'язі з великими архівами розрахованих ОС, дуже актуальна.

Література

1. Сучасні оптико-електронні комплекси як результат впровадження досягнень в області оптики / М. М. Мирошников [і др.] // Оптика ХХІ століття: матер. 6-го Міжр. оптичного конгресу, Санкт-Петербург, 18-21 окт. 2010: в 3 т. / ОО ім. Д.С. Різдвянського – СПб., 2010. Ч.1. С. 2–6.
2. Стафеев, С. К. Фотоніка і оптоінформатика в Європі: тенденції 2003-2013 / С. К. Стафеев [і др.] // Научно-технічний вісник інформаційних технологій, механіки і оптики. 2014. Т. 4 (92). С. 1–11.
3. Артюхіна, Н. К. Основи комп'ютерного моделювання оптичних систем: учеб.-метод. посібник. Мінськ: БНТУ, 2016. 225 с.
4. Smith, W. J. Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems. – 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 617 p.
5. Русінов, М. М. Композиція оптичних систем. Ленінград: Машинобудування, 1989. 383 с.
6. Національний інтернет-портал Республіки Білорусь URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Edmund_Scientific_Corporation.
7. Національний інтернет-портал Республіки Білорусь URL: <http://dictionary.reference.com/browse/europatent>.
8. Васильєв В. Н., Лившиц І. Л., Муромцев Д. І. Основи проектування експертних систем компоновки об'єктивів. Санкт-Петербург: Наука, 2012. 276 с.
9. Артюхіна Н. К., Шкадаревич А. П. Основи класифікаційних основ процедур структурного синтезу оптичних систем // Доклади НАН Білорусі. 2015. Т. 59, № 6. С. 52–56.
10. Артюхіна, Н. К. Теорія, методи проектування і розрахунок дзеркальних систем. Мінськ: БНТУ, 2009. 308 с.
11. Артюхіна Н. К., Марчик В. А. Технічні аспекти класифікації і каталогізації оптичних систем: матеріали 7-ї МНТК, «Приборостроєння 2014», (Мінськ, 19–21 ноябр. 2014 р.). Мінськ, 2014. С. 240–242.
12. Артюхіна Н. К. Оптика двохдзеркальних анастигматів // Вести НАН. Серія фіз.-техн. наук. 2012. № 1. С. 105–111.

УДК 535.317

¹⁾Н. К. Артюхіна, ²⁾О. П. Шкадаревич

¹⁾Білоруський національний технічний університет, м. Мінськ, Республіка Білорусь;

²⁾Науково-виробниче підприємство «Науково-технічний центр “ЛЭМТ”

БелОМО», Мінськ, Республіка Білорусь

КЛАСИФІКАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ З ВИБОРУ БАЗОВОЇ МОДЕЛІ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті показано актуальність створення бібліотек комп'ютерних програм, які призначені для моделювання і технологічної адаптації оптичних систем (ОС) будь-якого класу з урахуванням специфіки конструкторських розробок, особливостей технологічних процесів виготовлення оптичних деталей, а також збірки готових вузлів і приладів. Це обумовлено необхідністю комп'ютеризації проектування і обробки результатів вимірювань параметрів оптичних систем. Один з напрямків обчислювальної оптики полягає в постійному пошуку нових схем з поліпшеними характеристиками.

Таким чином, мета роботи полягає в створенні класифікаційного підходу до вибору вихідної системи (стартової точки проектування оптичних систем).

Представлені класифікаційні основи синтезу оптичних систем: класифікація оптичних схем, модулів, елементів; їх типи; каталогізація оптичних систем; методика формалізації знань за допомогою таблиць рішень;

індекс складності оптичної схеми і деякі евристичні правила формалізації переходу від вимог технічного завдання до вибору елементної бази оптичної системи.

Таким чином, показана актуальність формалізації процесу проектування оптичних систем, основами якої є питання класифікації і каталогізації в зв'язку з великими архівами розрахованих оптичних систем. При цьому класифікаційний підхід до каталогів оптичних систем може бути основним фактором скорочення термінів нових розробок. Такий підхід може використовуватися для розуміння необхідності створення архівів розробок і класифікації цієї інформації.

Ключові слова: класифікація, каталог, оптотехніка, розрахунок оптичних схем, оптимізація, відомості про основні параметри системи, якість зображення.

N. K. Artioukhina, A. P. Shkadarevich

¹⁾*Belarussian National Technical University. Minsk, Republic Belarus;*

²⁾*Scientific-technical center «LEMT», BelOMO, Minsk, Belarus*

CLASSIFICATION APPROACHES FOR THE SOLUTION OF THE TASK OF THE CHOICE OF BASIC MODEL OF OPTICAL SYSTEMS

The article shows the urgency of creating libraries of computer programs that are designed for modeling and technological adaptation of optical systems of any class, taking into account the specifics of design developments, the features of technological processes for manufacturing optical parts, and assembling ready units and devices. This is due to the need to computerize the design and processing of measurement results for optical system parameters. One of the trends in computational optics is the constant search for new circuits with improved characteristics.

Thus, the main objective of the work is to create a classification approach to the choice of the initial system (the starting point of the OS design).

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

Thus, the relevance of the formalization of the OS design process is shown, the bases of which are classification and cataloguing issues in connection with large archives of calculated OS. At the same time, the classification approach to the catalogs of optical systems may be the main factor in reducing the time for new developments. This approach can be used to understand the need to create development archives and classify this information.

Keywords: classification, catalog, optics engineering, calculation of optical schemes, optimization, report of key parameters of system, quality of the image.

*Надійшла до редакції
12 березня 2018 року*

*Рецензовано
27 березня 2018 року*

УДК 621: 681.7

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ

Стадничук В. С., Кондратенко Д. Ю.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

E-mail: SVS97@i.ua, deka@email.ua

В данной работе рассмотрены и проанализированы существующие конструкции оптико-электронных систем активной безопасности, помощи вождению, основные причины возникновения ДТП, концепции автономного вождения, предложена разработка собственного универсального оптико-электронного прибора для всех типов автомобилей. Основным недостатком таких систем является отсутствие мобильности. Анализ существующих систем активной безопасности выявил ряд бесспорных преимуществ оптико-электронных систем, а также доказал эффективность их применения.

Ключевые слова: ADAS, Autonomous Driving Car, SLAM, LIDAR, SAE, обработка изображений.