

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**С. А. РОДИОНОВ, В.В. УСОСКИН, Л.И. ПРЖЕВАЛИНСКИЙ, В.Г. РЕЗНИК,
Н.И.ХЛУСОВА**

Рассматриваются основные этапы развития автоматизации проектирования оптических систем в ЛИТМО, описаны принципы, математический аппарат и архитектура автоматизированной системы проектирования оптических систем на базе ЕС ЭВМ, разработанной в ЛИТМО.

Автоматизация проектирования на базе использования математических методов и средств вычислительной техники является мощным фактором научно-технического прогресса и играет ведущую роль в деле повышения производительности труда и качества продукции. В оптическом приборостроении в первую очередь автоматизируется проектирование оптических систем приборов. Проектирование или, как обычно говорят, расчет оптических систем – сложный творческий процесс, особенностью которого является большое количество трудоемких вычислений, выполняемых по относительно небольшому количеству унифицированных алгоритмов, поэтому применение ЭВМ для этих целей было наиболее естественным и сразу же принесло существенный эффект.

Автоматизация проектирования в оптике имеет большую историю: одна из первых вычислительных машин Mark-1 уже в 1944 г. использовалась для расчетов оптических систем [1], а с 1950-х годов ЭВМ применяются систематически.

В процессе своего исторического развития автоматизация проектирования оптических систем, как и других объектов, прошла несколько стадий–уровней. Низшим уровнем является наличие отдельных, не связанных между собой программ, обеспечивающих выполнение на ЭВМ некоторых наиболее трудоемких или частых операций проектирования. Следующим уровнем является объединение программ в пакеты прикладных программ (ППП) с общей идеологией и системой математических моделей объекта проектирования. Высшим уровнем автоматизации являются системы автоматизированного проектирования (САПР), в которых оптимальным образом распределены функции между конструктором и ЭВМ. Отличительными особенностями САПР в оптике являются: единая система математических моделей проектируемого объекта (оптической системы); наличие личных архивов конструктора, обеспечивающих хранение и удобное использование исходных данных, промежуточных и окончательных результатов, а также банка общесистемных данных, наличие универсального и машинно-независимого языка общения конструктора с ЭВМ; работа под управлением диспетчера, организующего взаимодействие ЭВМ с оптиками, и выполнение всех их заказов путем вызова необходимых программ и, наконец, работа в диалоговом (интерактивном) режиме с наглядным отображением

информации, позволяющая оптику-конструктору легко оценивать результаты и принимать эвристические решения о дальнейшем ходе процесса проектирования.

Большой вклад в разработку и развитие методов автоматизированного проектирования оптических систем принадлежит советским оптикам [2–10, 14].

В Ленинградском институте точной механики и оптики работы в области автоматизации проектирования оптических систем ведутся с 1959 г., когда на кафедре вычислительной техники была создана специализированная ЭВМ «ЛИТМО-1» для выполнения оптических расчетов. В разработке алгоритмов для этой ЭВМ принимали участие сотрудники кафедры оптико-механических приборов.

С 1965 г. сотрудниками кафедры оптико-механических приборов под руководством профессора М. М. Русинова и вычислительной лаборатории ЛИТМО ведутся систематические работы в области автоматизации проектирования оптических систем, с 1973 г. эти работы выполняются совместно с Ленинградским оптико-механическим объединением (ЛОМО им. В. И. Ленина).

1965-1970гг. – этап разработки отдельных программ, автоматизирующих расчет хода лучей через системы из сферических и несферических поверхностей, а также программ оптимизации оптических систем на ЭВМ «Минск-2», «Минск-22» [11]. В процессе работы над этими программами и их эксплуатации в течение ряда лет многими организациями выявилось, что дальнейшее развитие методов автоматизированного проектирования на базе понятий и приемов традиционной технической оптики мало перспективно и требует в первую очередь создания адаптированных к машинной обработке математических моделей оптической системы как объекта проектирования.

К моменту перехода на ЭВМ третьего поколения (ЭВМ Единой Системы) совокупность таких математических моделей и методов их обработки в процессе проектирования, составляющая теоретическую базу автоматизации проектирования в оптике, была в общих чертах разработана, что способствовало построению САПР оптических систем уже на новых принципах.

Рассмотрим основные черты этой теоретической базы. Оптическая система как объект проектирования может быть представлена следующими математическими моделями.

Конструктивная модель даст полное численное описание конструкции оптической системы и включает в себя параметры оптических сред, параметры формы оптических поверхностей, параметры взаимного расположения поверхностей и параметры диафрагм.

Функциональные модели описывают формирование изображения в оптических системах. Внешняя функциональная модель не затрагивает физической сущности работы оптической системы и описывает последнюю как преобразователь сигнала общего вида. Эта модель применяется при анализе работы оптической системы совместно с другими преобразователями, такими как электронно-оптические элементы, фотографические приемники и т.п.

Основные характеристики внешней функциональной модели – это передаточные характеристики, показывающие влияние оптической системы как изображающего прибора на передаваемый сигнал и присоединительные, необходимые для согласования ее с соседними звеньями каскада преобразователей. Такие характеристики оптической системы как увеличение, светосила, функция рассеяния точки (ФРТ), оптическая передаточная функция (ОПФ) относятся к передаточным характеристикам, а поле зрения и изображения, передний и задний отрезки, положения зрачков, апертуры и спектральный интервал – к присоединительным.

Внутренняя функциональная модель описывает физические аспекты формирования оптического изображения и построена на базе геометрически-волновой теории аббераций. Основной характеристикой этой модели является так называемая зрачковая функция, показывающая влияние оптической системы на электромагнитное поле, которое идет от объекта. Обе модели – внешняя и внутренняя – объединены универсальной системой обобщенных характеристик и канонических координат [13], позволившей получить простые соотношения, справедливые для любых оптических систем, разделить влияние таких факторов как апертуры, длина волны и абберации и унифицировать алгоритмы обработки этих моделей.

Оптимизационная модель представляет оптическую систему как объект численной оптимизации. Основные компоненты этой модели – это параметры оптимизации, т.е. совокупность величин, однозначно связанных с конструктивными параметрами и изменяющихся в процессе оптимизации, оптимизируемые функции, т.е. характеристики оптической системы, которые зависят от параметров оптимизации и определяют качество оптимизируемой системы в данной модели, оценочная функция, объединяющая все оптимизируемые функции в один критерий, максимум или минимум которого ищется при оптимизации, и соотношения, связывающие оптимизируемые функции и параметры оптимизации (так называемая «проба функций»).

Статистическая модель представляет оптическую систему как случайный объект, полученный в процессе изготовления и сборки вследствие неизбежных случайных технологических погрешностей. Основные компоненты этой модели – статистические параметры технологических погрешностей и соотношения, связывающие их со статистическими параметрами характеристик внутренней и внешней функциональных моделей.

Процесс проектирования оптической системы рассматривается как последовательность некоторых операций над описанными моделями, причем эти операции оцениваются по степени их эвристичности или детерминированности, объектно-ориентированности или инвариантности и сравнительной трудоемкости. Отсюда естественно возникает концепция рациональной автоматизации проектирования – возложить на ЭВМ выполнение всех детерминированных (и в первую очередь наиболее трудоемких операций), и предоставить конструктору возможность выполнения эвристических оценок ситуации и принятия решений по всех необходимых точках. Логично выделять

объектно-инвариантные процедуры в виде стандартных алгоритмов общего назначения с целью достижения наибольшей универсальности системы.

Оказалось возможным выделить следующие основные операции над моделями в процессе проектирования: анализ, синтез и оптимизацию.

Анализ подразумевает конструктивную модель уже существующей и заключается в определении характеристик функциональных моделей по известным значениям конструктивных параметров. В соответствии с несколькими функциональными моделями анализ разделяется на несколько уровней и подуровней. Первый уровень анализа – это определение характеристик внутренней функциональной модели по известным конструктивным параметрам. Он включает в себя следующие подуровни:

- анализ в гауссовой области (определение парааксиальных характеристик);
- анализ в зейделевой области (определение аберраций третьего порядка);
- вычисление аберраций небольшого количества действительных лучей;
- определение габаритов пучков;
- полный анализ аберраций, т.е. получение коэффициентов аппроксимирующего выражения, полностью описывающего функцию волновой аберрации оптической системы, и формирование зрачковой функции;
- анализ влияния конструктивных параметров на внутренние характеристики.

Полученная на первом уровне анализа информация, т.е. характеристики внутренней модели заменяют собой оптическую систему на последующих уровнях анализа, где, таким образом, конструктивные параметры системы уже не требуются. Второй уровень анализа—определение характеристик внешней модели по характеристикам внутренней модели. Основная задача состоит в получении структурных передаточных характеристик – ФРТ и ОПФ – численными методами по известной зрачковой функции. Применение тех или иных методов определяется целью, для которой вычисляются ФРТ и ОПФ. Если вычисления производятся для оценки качества изображения, когда достаточно иметь суждение о виде этих функций по небольшому количеству их значений в одном-двух сечениях, рационально использовать общие и специальные методы численного интегрирования [12]. Если предполагается последующее моделирование работы оптической системы, для чего необходима полная информация об ОПФ и ФРТ, более эффективными оказываются методы дискретного быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Следующий уровень анализа предусматривает моделирование работы оптической системы как изображающего прибора. Входной информацией на этом уровне служат передаточные характеристики (ФРТ и ОПФ) и функции, описывающие объект, выходными результатами – функции, описывающие вид изображения.

Наконец, отдельным видом анализа является технологический анализ, заключающийся в определении допусков на технологические ошибки. Все операции анализа являются детерминированными, а некоторые из них, в

частности на высших уровнях, весьма трудоемки. Математический аппарат анализа объектно-ориентирован в том смысле, что он специфичен для оптических систем, но не зависит от конкретного типа системы.

Под синтезом будем понимать первоначальное генерирование конструктивных параметров оптической системы, отвечающей заданным требованиям. Синтез – почти всегда эвристическая операция и сугубо объектно-ориентированная, математический аппарат и алгоритмы синтеза специфичны не только для оптических систем вообще, но и для конкретного типа системы. Поддаются алгоритмизации только простейшие виды синтеза, такие, как поиск прототипа при помощи информационно-поисковой системы (ИПС), синтез простейших типов систем (склеенного дублета), синтез из поверхностей с заданными свойствами. К синтезу отнесем также операции сборки оптической системы из нескольких систем и ее перестроение (удаление или добавление конструктивных элементов, оборачивание, изменение в масштабе и т. п.).

В процессе синтеза редко удается получить систему, полностью удовлетворяющую всем заданным требованиям, поэтому обязательной операцией при проектировании является оптимизация, под которой будем понимать направленное изменение конструктивных параметров, начиная от некоторой исходной системы с целью достижения наилучших, оптимальных значений характеристик.

Математический аппарат и алгоритм оптимизации связаны не с самой оптической системой, а с ее оптимизационной моделью, поэтому, поскольку эта последняя построена, операция оптимизации оказывается совершенно объектно-инвариантной и детерминированной, причем отличается значительной трудоемкостью.

Выбор же оптимизационной модели для конкретной оптической системы, т. е. решение вопросов: «что оптимизировать?» и «чем оптимизировать?» оказывается весьма эвристической задачей, способность правильного выбора оптимизационной модели приходит с опытом. Основные требования к оптимизационной модели сводятся к следующему:

- параметры оптимизации должны достаточно активно влиять на все оптимизируемые функции, среди них не должно быть не влияющих или линейно зависящих от остальных (лишних параметров);
- оптимизируемые функции должны быть такими, чтобы оценочная функция (критерий оптимизации), обычно равная сумме квадратов оптимизируемых функций, была бы хорошо коррелировала с критериями качества изображения;
- оптимизируемые функции должны быть связаны с параметрами оптимизации наиболее простыми и близкими к линейным зависимостям.

Все эти требования трудно совместимы, и практика показывает, что недостаточно ограничиться каким-либо одним видом оптимизационной модели, оптимизация почти всегда должна проводиться в несколько этапов с постепенным усложнением и видоизменением оптимизационной модели.

В качестве методов оптимизации оптических систем используются исключительно методы локального детерминированного спуска [6, 11, 14], из которых наибольшую эффективность показал так называемый демпфированный метод наименьших квадратов.

Из перечисленных операций и составляется последовательность действий в процессе проектирования оптических систем, укрупненная блок-схема которого показана на рис. 1. В этом процессе детерминированные операции, выполняемые ЭВМ (показаны в прямоугольниках) разделены эвристическими, выполняемыми конструктором (показаны в трапециях), а также показанными ромбами операциями принятия эвристических решений.

Из анализа этой схемы, а также на основе описанной теоретической базы можно построить и программную структуру автоматизированной системы, наиболее эффективно обеспечивающей процесс проектирования оптических систем. Эта структура состоит из двух основных частей: системной и проблемной, первая из которых включает в себя диспетчер, организующий взаимодействие с пользователем и выполнение его заказов путем вызова соответствующих проблемных программ, и банк данных, через который производится обмен информацией между пользователем и системой, а также между отдельными программами. Проблемная часть программного обеспечения состоит из библиотеки унифицированным образом организованных программ, выполняющих отдельные операции проектирования «функциональных блоков». Сюда входят блоки трансляции с входного языка, блоки анализа, синтеза, оптимизации, блоки отображения результатов и т.д. В свою очередь, функциональные блоки рационально собирать из стандартных программ, решающих элементарные задачи как общематематического характера (проблемно-инвариантные), например, задачи линейной алгебры, так и оптического (объектно-ориентированные), например, расчет луча через поверхность и т. п.

Примерная структура такой программной системы показана на рис. 2. Заметим, что изложенные принципы построения автоматизированной системы проектирования в сокращенном варианте успешно реализуются не только на больших ЭВМ с быстродействием 500 тыс. опер/с и объемом оперативной памяти 1 Мбайт, но и на клавишных мини-ЭВМ с программным управлением. Пакет программ для таких ЭВМ решает отдельные задачи анализа и синтеза оптических систем, небольшой диспетчер вызывает программы по требованию конструктора.

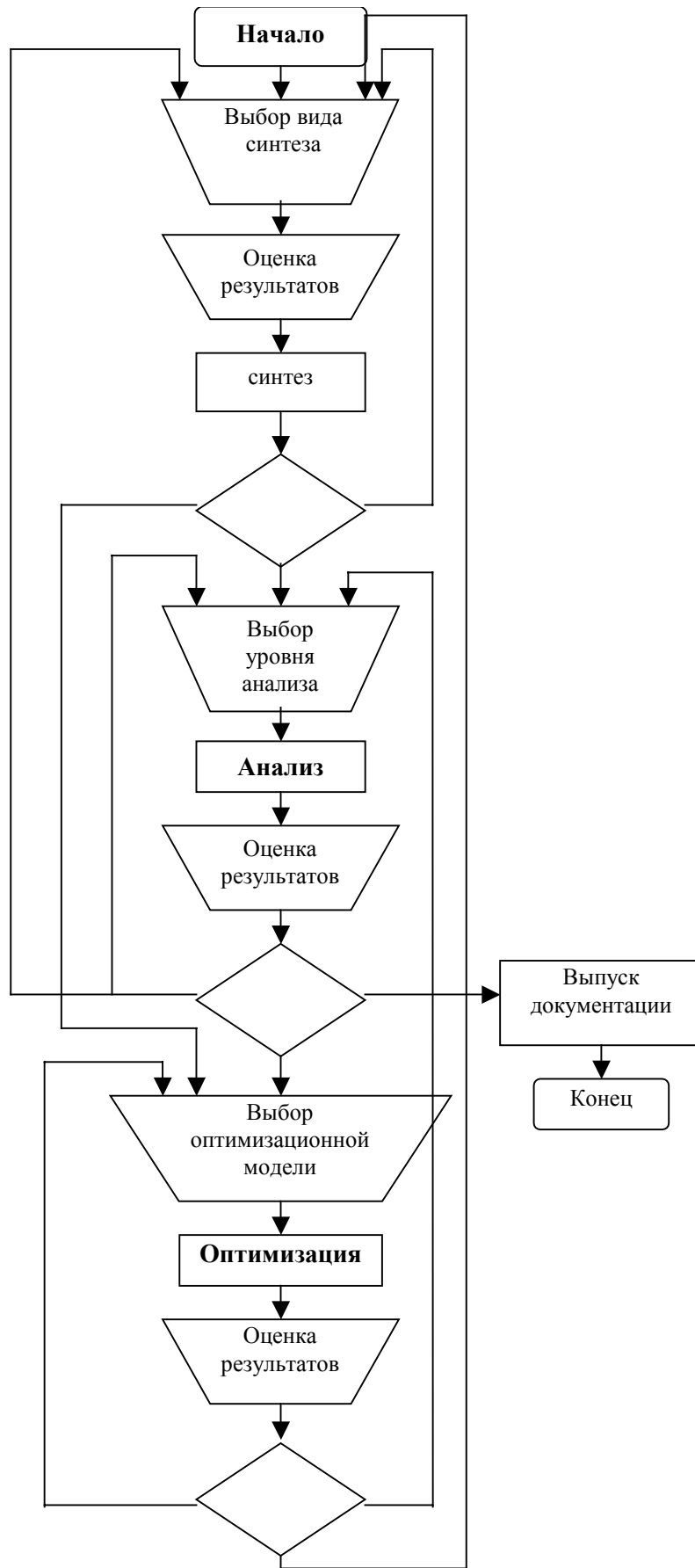


Рис.1

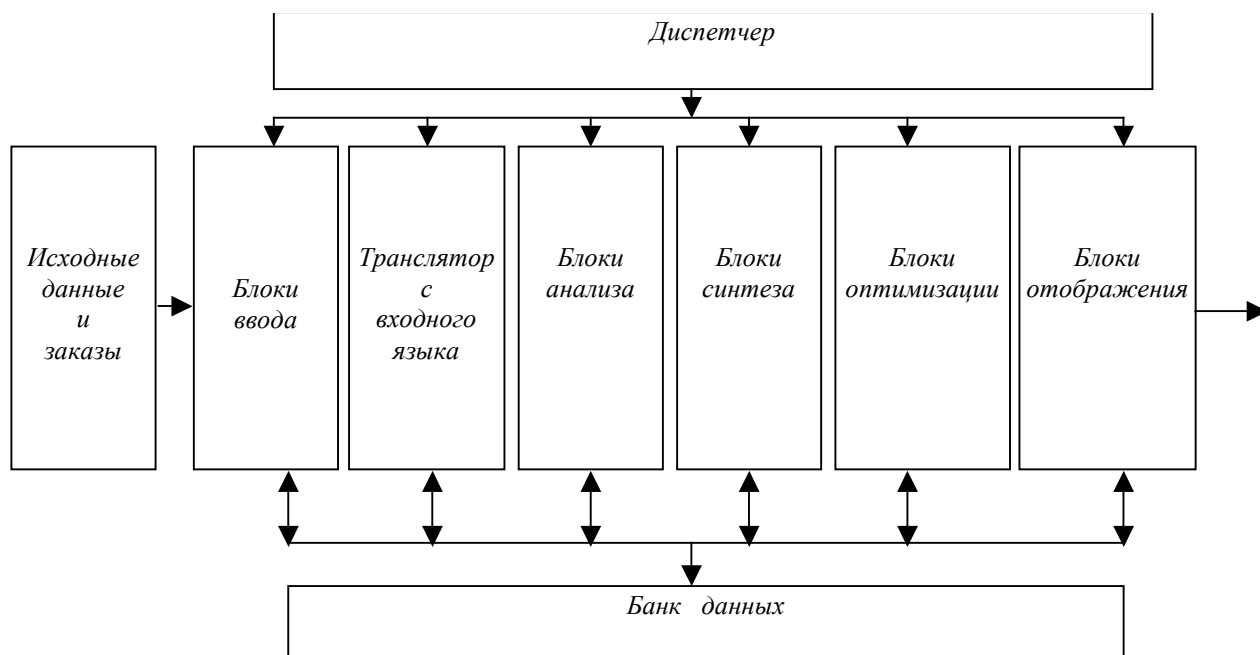


Рис.2

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка качества оптического изображения. – М.: Геодезиздат, 1959.
2. Грамматин А. П. Математические основы автоматического расчета оптических систем. – Оптико-механическая промышленность, 1959, №7.
3. Грамматин А. П. Автоматический расчет оптических систем с помощью усовершенствованного метода Ньютона. – Оптико-механическая промышленность, 1967, № 2.
4. Грамматин А. П., Деген А. Б., Рыбаков И. П. Универсальная программа для автоматизированного расчета оптических систем на ЭВМ БЭСМ-4. – Тр. ГОИ. 1970, т. 37, вып. 167. с. 5.
5. Грамматин А. П., Деген А. Б. Методика расчета оптических систем с использованием ЭВМ. – Оптико-механическая промышленность, 1974. №.2.
6. Леонова В. Б. Автоматизация расчетов оптических систем. – М.: Машиностроение, 1970.
7. Лебедев И. В. Формулы для просчета «косых» лучей через любую оптическую систему без применения таблиц. – Оптико-механическая промышленность, 1938, № 7.
8. Ленский А. В. О вычислении ЧКХ по методу Гопкинса. – Оптика и спектроскопия, 1967, вып. 2.
9. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969.
10. Пейсахсон И. В., Тарнакин И. Н. О расчете лучей в произвольных оптических системах. – Оптико-механическая промышленность, 1966, № 11.
11. Родионов С. А. Применение ЭЦВМ в оптических расчетах. – Изв. вузов СССР-Приборостроение, 1968, т. XI, № 3.
12. Родионов С. А., Усоскин В. В. Вычисление оптической передаточной функции центрированных оптических систем при помощи эллиптической аппроксимации области интегрирования. – Изв. вузов СССР-Приборостроение, 1972, т. XV, № 8.
13. Родионов С. А. Типы оптических систем и конкретизация обобщенных характеристик. – Труды ЛИТМО, вып. 75, 1974.
14. Цено Н. В. Автоматический метод расчета сложных оптических систем. – Оптико-механическая промышленность, 1966, № 9.